



**Frederico Miguel Pacheco Torego**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

## **Análise de Novos Materiais de Adição para Reparação Naval**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Mestrado  
Integrado em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Doutora Rosa Maria Mendes Miranda,  
Professora Associada com Agregação,

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Mestre José Alexandre, Lisnave



**Dezembro de 2014**



“Copyright” Frederico Miguel Pacheco Torego, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou em forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.





## Dedicatória

"Vem por aqui" — dizem-me alguns com os olhos doces  
Estendendo-me os braços, e seguros  
De que seria bom que eu os ouvisse  
Quando me dizem: "vem por aqui!"  
Eu olho-os com olhos lassos,  
(Há, nos olhos meus, ironias e cansaços)  
E cruzo os braços,  
E nunca vou por ali...  
A minha glória é esta:  
Criar desumanidades!  
Não acompanhar ninguém.  
— Que eu vivo com o mesmo sem-vontade  
Com que rasguei o ventre à minha mãe  
Não, não vou por aí! Só vou por onde  
Me levam meus próprios passos...  
Se ao que busco saber nenhum de vós responde  
Por que me repetis: "vem por aqui!"?

Prefiro escorregar nos becos lamacentos,  
Redemoinhar aos ventos,  
Como farrapos, arrastar os pés sangrentos,  
A ir por aí...  
Se vim ao mundo, foi  
Só para desflorar florestas virgens,  
E desenhar meus próprios pés na areia inexplorada!  
O mais que faço não vale nada.

Como, pois, sereis vós  
Que me dareis impulsos, ferramentas e coragem

Para eu derrubar os meus obstáculos?...  
Corre, nas vossas veias, sangue velho dos avós,  
E vós amais o que é fácil!  
Eu amo o Longe e a Miragem,  
Amo os abismos, as torrentes, os desertos...

Ide! Tendes estradas,  
Tendes jardins, tendes canteiros,  
Tendes pátria, tendes tetos,  
E tendes regras, e tratados, e filósofos, e sábios...  
Eu tenho a minha Loucura!  
Levanto-a, como um facho, a arder na noite escura,  
E sinto espuma, e sangue, e cânticos nos lábios...  
Deus e o Diabo é que guiam, mais ninguém!  
Todos tiveram pai, todos tiveram mãe;  
Mas eu, que nunca principio nem acabo,  
Nasci do amor que há entre Deus e o Diabo.

Ah, que ninguém me dê piedosas intenções,  
Ninguém me peça definições!  
Ninguém me diga: "vem por aqui!"  
A minha vida é um vendaval que se soltou,  
É uma onda que se levantou,  
É um átomo a mais que se animou...  
Não sei por onde vou,  
Não sei para onde vou  
Sei que não vou por aí!

"Cântico Negro" de José Régio

*A ti te dedico minha querida mãe...*



## **Agradecimentos**

Este espaço é totalmente dedicado a todos aqueles que directa e/ou indirectamente contribuíram para a realização desta dissertação. Gostaria de prestar um profundo agradecimento:

À Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e a todos os Professores com que me cruzei, pela oportunidade e o privilégio que tive em frequentar este Mestrado que muito contribuiu para o enriquecimento da minha formação académica e científica.

À minha Coordenadora, Professora Doutora Rosa Miranda, pela inspiração que me incutiu ao longo destes anos e que me levou à realização desta dissertação, pela sua orientação, pela sua partilha de conhecimento, pelas opiniões e críticas que me ajudaram a solucionar os problemas que foram aparecendo ao longo deste estudo.

Aos estaleiros da Lisnave pela aceitação do projecto.

Ao meu Orientador na Lisnave, Mestre José Alexandre e à engenheira Ana Cartaxo, pela partilha de conhecimento, pela total disponibilidade ao longo destes meses, fundamental para o desenvolvimento desta dissertação, pela enorme paciência e por me terem recebido e orientado da melhor forma possível.

Aos Técnicos, Alcino, Ferreira e Coxixo, pela partilha de conhecimento, pelo companheirismo e momentos sempre animados que me ajudaram nas fases mais complicadas desta dissertação.

Aos meus colegas de curso, pelo companheirismo, por todos os momentos bons e menos bons, nos quais sempre estiveram presentes.

Por último, mas muito especiais, aos meus queridos pais e namorada que tão importantes foram e cujo agradecimento seria digno do tamanho desta dissertação. Obrigado por tudo!





## Resumo

A crescente competitividade empresarial existente nos dias de hoje leva as empresas a adquirir uma postura diferente face ao mercado. A concorrência dos países que têm como maior trunfo a abundância de mão-de-obra barata como a China, Índia e Coreia do Sul, obriga os países ditos mais desenvolvidos a traçar uma nova estratégia. Essa estratégia passa pela diferenciação do produto em termos qualitativos, pela procura de novos materiais e técnicas de fabrico inovadoras, pela implementação de alta tecnologia aliada à constante preocupação ambiental.

A Lisnave é uma empresa prestadora de serviços na área da reparação e manutenção naval, área que se tem vindo a mostrar bastante lucrativa no sector naval. Nos inúmeros serviços prestados pela empresa, o recurso a juntas soldadas é constante, levando à necessidade de se realizar um estudo de novos materiais de adição utilizados no processo de soldadura por fios fluxados autoprotégidos. Trata-se de um processo que pode funcionar em estaleiro e que permite maiores rendimentos, uma redução significativa no desperdício de material por se tratar de um consumível contínuo, levando a uma redução de tempo de soldadura e consequentemente a uma redução do custo global de soldadura.

Este trabalho visou estudar a soldadura em reparação naval de 2 fios consumíveis: Um fio autoprotégido (FABSHIELD XLR-8) e um fluxado (FLUXOFIL 19HD) com protecção gasosa por  $CO_2$ .

Realizaram-se as soldaduras em aço S355J2+N com os dois materiais de adição e caracterizaram-se estrutural e mecanicamente e concluiu-se que o fio fluxado permite tenacidade a baixa temperatura superior à conseguida com o autoprotégido na aplicação visada dado a microestrutura produzida na ZTA e na ZF.

**Palavras-Chave:** Indústria Naval; Fios fluxados; Fios autoprotégidos; Reparação naval; S355J2+N



## Abstract

The increasing business competitiveness existing nowadays leads companies to have a different approach to the market. The competition from countries whose biggest asset is plenty of manpower cheap labor like China, India and South Korea requires the most developed countries to chart a new strategy. This strategy involves the product differentiation in terms of quality, the search for new materials and innovative manufacturing techniques, and the implementation of high technology combined with constant environmental concern.

Lisnave is a company that provides services in the area of naval repair and maintenance, this area has been shown to be quite profitable in the naval sector. Among the numerous services provided by the company, the use of welded joints is constant, leading to the need to conduct a study of new materials used in the process of adding welding self-shielded flux-cored wires. It is a process that can work in a shipyard and allows more income and reduces significantly the amount of material wasted since it is a continuous consumable, leading to a reduction in welding time and consequently a reduction in the overall cost of welding.

This work aims to study welding in ship repair of two consumable wires: Being the first one a self-protecting wire (FABSHIELD XLR-8) and the second a flux-cored wire (FLUXOFIL 19HD) with shielding gas by  $CO_2$ . Were performed with S355J2+N steel welds with the two filler materials and were characterized structurally and mechanically, concluding that the flux-cored wire allows the low temperature toughness, superior to the one achieved with the self-protecting wire given in the target application microstructure produced in the Heat-Affected Zone (HAZ) and in the Fusion Zone.

**Keywords** : Naval industry; flux-cored wires; Self shielded wires; ship repair; S355J2+N



## Simbologia e Notações

114	-	Processo de soldadura por fios fluxados autoprotégidos (ISO 4063:2009)
136	-	Processo de soldadura por fios fluxados com protecção gasosa activa (ISO 4063:2009)
I	-	Intensidade de corrente (A)
ASTM	-	American society for testing and materials
BS	-	British standard
Ceq	-	Carbono equivalente
ED	-	Ensaio destrutivo
Et	-	Entrega térmica (J/cm)
EN	-	Norma europeia
END	-	Ensaio não destrutivo
FCAW	-	Flux cored arc welding
GMAW	-	Gás metal arc welding
HV	-	Ensaio de dureza Vickers
ISO	-	International organization for standardization
MA	-	Material de adição
MB	-	Material base
MF	-	Material fundido
MIG/MAG	-	Metal inert/active gas
NP	-	Norma portuguesa
PME	-	Pequena média empresa
Ra	-	Rugosidade em ( $\mu$ )
Re	-	Tensão de cedência ( $\text{N/mm}^2$ )
Rm	-	Tensão de rotura ( $\text{N/mm}^2$ )
SAW	-	Submerged arc welding
SMAW	-	Shielded metal arc welding
Stick-out	-	Extensão livre de eléctrodo (mm)
TR	-	Technical report
V	-	Tensão de corrente (V)
v	-	Velocidade de soldadura (cm/s)
ZF	-	Zona fundida
ZTA	-	Zona termicamente afectada



# Índice

1. INTRODUÇÃO ALARGADA .....	1
1.1. MOTIVAÇÃO.....	1
1.2. OBJECTIVOS .....	1
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	1
2. ESTADO DA ARTE .....	3
2.1. INDÚSTRIA NAVAL: EVOLUÇÃO E ACTUAL CONJUNTURA .....	3
2.2. SOLDADURA COM FIOS FLUXADOS (FCAW) .....	8
2.2.1 <i>Descrição do processo</i> .....	8
2.2.2 <i>Variantes do processo</i> .....	9
2.2.3 <i>Vantagens e desvantagens do processo</i> .....	10
2.3 PARÂMETROS DO PROCESSO DE SOLDADURA E CONSEQUÊNCIAS DA SUA MANIPULAÇÃO.....	12
2.3.1 <i>Intensidade de corrente de soldadura / velocidade da alimentação de fio</i> .....	12
2.3.2 <i>Tensão do arco eléctrico</i> .....	13
2.3.3 <i>Extensão livre de eléctrodo (“Stick-out”)</i> .....	15
2.3.4 <i>Velocidade de soldadura</i> .....	16
2.3.5 <i>Taxa de depósito</i> .....	17
2.4. APLICAÇÕES .....	18
2.4.1 <i>Transportadoras de produtos químicos em cisternas de aço duplex</i> .....	18
2.4.2 <i>Soldaduras offshore em sistemas de ancoragem</i> .....	19
2.5. PROBLEMAS DE SOLDABILIDADE.....	21
2.5.1 <i>Fissuração a frio</i> .....	21
2.5.2 <i>Fissuração a Quente</i> .....	22
2.5.3 <i>Arrancamento lamelar e fissuração no reaquecimento</i> .....	24
2.6. FACTORES QUE INFLUENCIAM A TÊMPERA EM SOLDADURA.....	25
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	27
3.1. MATERIAIS.....	27
3.2. EQUIPAMENTOS DE SOLDADURA .....	29
3.3. ENSAIOS DE SOLDADURA .....	30
3.4. ENSAIOS DESTRUTIVOS E NÃO DESTRUTIVOS PARA QUALIFICAÇÃO.....	30



3.5. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS (END) .....	32
3.6 ENSAIOS DESTRUTIVOS .....	35
4. RESULTADOS .....	39
4.1. SOLDADURA.....	39
4.2. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS.....	43
4.2.1. <i>Líquidos penetrantes</i> .....	43
4.2.2. <i>Radiografia</i> .....	43
4.3. ENSAIOS DESTRUTIVOS.....	44
4.3.1. <i>Macrografias</i> .....	45
4.3.2. <i>Micrografias</i> .....	47
4.3.3. <i>Ensaio de tracção</i> .....	54
4.3.4. <i>Ensaio de dobragem</i> .....	56
4.3.5. <i>Ensaio de impacto</i> .....	58
4.3.6. <i>Ensaio de dureza</i> .....	60
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	65
6. BIBLIOGRAFIA .....	67
7. ANEXOS .....	71

## Índice de Figuras

Figura 2.1 - Capacidade mundial em construção naval [1, 2].	3
Figura 2.2 - Principais rotas de comércio [3].	4
Figura 2.3 - Evolução mundial da construção naval [1, 4].	5
Figura 2.4 - Evolução Europeia da construção naval [4].	6
Figura 2.5 - Evolução portuguesa da construção naval [4].	6
Figura 2.6 - Volume de vendas dos estaleiros do universo AIM ( milhões de euros ) [6].	7
Fig.2.7 - Processo de soldadura com fio fluxado auto protegido (114) [11].	8
Figura 2.8 - Gráfico Dureza vs intensidade de corrente para uma velocidade de soldadura de 20 cm/min. [10].	12
Figura 2.9 - Influência do valor da tensão eléctrica na largura de cordão num aço de baixo carbono com o processo <i>FCAW</i> com protecção gasosa. a) 26 V, b) 30 V e c) 34 V [15].	13
Figura 2.10 – Porosidades A) à superfície, B) no Interior do cordão e C) visíveis a raio-X [17, 18].	14
Figura 2.11 - Falta de penetração [19].	14
Figura 2.12 - Efeito da intensidade de corrente eléctrica e da velocidade de soldadura na penetração para a) 20cm/min., b) 40cm/min. e c) 60cm/min. [10].	16
Figura 2.13 - Efeito da velocidade de soldadura na largura de cordão para a) 40cm/min., b) 50cm/min. e c) 60cm/min. [15].	17
Figura 2.14 – Variação da microestrutura do cordão de soldadura com o aumento da velocidade de soldadura [10].	17
Figura 2.15–Transportadores de produtos químicos em cisternas [20, 21].	18
Figura 2.16 – Aspecto de fissurações a frio [24].	22
Figura 2.17 - Fissuração a quente A) na soldadura do alumínio 6061 e B) no talão da placa do alumínio 7075 [24].	22
Figura 3.1 - Dimensões da junta a soldar.	30
Figura 3.2 - Localização da remoção dos provetes.	31
Figura 3.3 - Fluxograma para líquidos penetrantes removíveis com solventes.	34
Figura 3.4 - Ensaio dobragem - Dobragem transversal lateral	36

Figura 3.5 - Ensaio de impacto charpy V . A) Representação da máquina para ensaio de impacto charpy e B) localização dos entalhes perpendiculares à superfície de teste [37].	37
Figura 3.6 - Ensaio de dureza - localização e classificação das zonas de medições no corpo de prova [35].	38
Figura 4.1 - Sequência de cordões na soldadura realizada com o fio FLUXOFIL 19 HD A) Junta a soldar, B) Passes pré reprise e C) Passes pós reprise.	42
Figura 4.2 - Sequência de cordões na soldadura realizada com fio da FABSHIELD XLR-8 A) Junta a soldar, B) Passes pré reprise e C) Passes pós reprise.	42
Figura 4.3 - Radiografia - Soldadura realizada com fio FLUXOFIL 19 HD.	43
Figura 4.4 - Radiografia - Soldadura realizada com fio FABSHIELD XLR-8.	43
Figura 4.5 - Macrografia à soldadura realizada com fio FLUXOFIL 19 HD	46
Figura 4.6 - Macrografia à soldadura realizada com fio FABSHIELD XLR-8	46
Figura 4.7 - Ensaio de tracção - Local de fractura nos provetes soldados pelo fio A) FLUXOFIL 19 HD e B) FABSHIELD XLR-8.	55
Figura 4.8 - Ensaio de tracção - Superfície da fractura nos provetes soldados pelo fio A) FLUXOFIL 19 HD e B) FABSHIELD XLR-8.	55
Figura 4.9 - Ensaio de dobragem - Provetes soldados com fio A) FLUXOFIL 19 HD e B) FABSHIELD XLR-8.	56
Figura 4.10 - Ensaio de dobragem - Superfície de dobragem dos provetes soldados com A) FLUXOFIL 19 HD e B) FABSHIELD XLR-8.	57
Figura 4.11 - Ensaio de impacto - Superfície da fractura nos provetes soldados pelo fio A) FLUXOFIL 19 HD e B) FABSHIELD XLR-8.	59
Figura 4.12 - Localização dos ensaios de dureza adicionais na ZTA com o fio FLUXOFIL 19 HD	61
Figura 4.13 - Gráfico da variação da dureza ao longo dos eixos A-A', B-B' e C-C' da soldadura com o fio FLUXOFIL 19 HD	61
Figura 4.14 - Localização dos ensaios de dureza adicionais na ZTA com o fio FABSHIELD XLR-8	62
Figura 4.15 - Gráfico da variação da dureza ao longo dos eixos A-A', B-B' e C-C' da soldadura com o fio FABSHIELD XLR-8	63

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Propriedades dos aços segundo a norma IACS W22 [22].....	20
Tabela 3.1 - Composição química e propriedades mecânicas do aço S355J2+N.....	27
Tabela 3.2 - Consumíveis em estudo.....	28
Tabela 3.3 - Composição química e propriedades mecânicas do material de adição FLUXOFIL 19 HD. ....	28
Tabela 3.4 - Composição química e propriedades mecânicas do material de adição FABSHIELD XLR-8. ....	29
Tabela 3.5 - Inspeção e ensaios dos provetes segundo a norma EN ISO 15614-1 [26]. .....	31
Tabela 4.1 - Parâmetros médios para cada passe.....	40
Tabela 4.2 - Parâmetros médios para os cordões de raiz, de enchimento e de face. ....	40
Tabela 4.3 - Parâmetros médios para cada passe.....	41
Tabela 4.4 - Parâmetros médios para cordões de raiz, de enchimento e de face.....	41
Tabela 4.5 - Plano de ensaios de materiais. ....	44
Tabela 4.6 - Micrografia ao aço carbono-manganês S355J2+N. ....	49
Tabela 4.7 - Micrografias à soldadura realizada com o fio FLUXOFIL 19 HD. ....	50
Tabela 4.8 - Micrografias à soldadura realizada com o fio FLUXOFIL 19 HD. ....	51
Tabela 4.9 - Micrografias à soldadura realizada com o fio FABSHIELD XLR-8.....	52
Tabela 4.10 - Micrografias à soldadura realizada com o fio FABSHIELD XLR-8.....	53
Tabela 4.11 - Resultados dos ensaios de tracção.....	54
Tabela 4.12 - Resultados dos ensaios de tracção.....	54
Tabela 4.13 - Resultados dos ensaios de dobragem. ....	56
Tabela 4.14 - Resultados dos ensaios de impacto. ....	58
Tabela 4.15 - Resultados dos ensaios de impacto. ....	59
Tabela 4.16 - Resultados dos ensaios de dureza.....	60
Tabela 4.17 - Resultados dos ensaios de dureza.....	60
Tabela 4.18 - Resultados dos ensaios adicionais de dureza. ....	61
Tabela 4.19 - Resultados dos ensaios de dureza.....	62
Tabela 4.20 - Resultados dos ensaios de dureza.....	62
Tabela 4.21 - Resultados dos ensaios adicionais de dureza. ....	62



# **1. Introdução alargada**

## **1.1. Motivação**

A indústria nacional de reparação naval depara-se com grandes problemas, da competitividade internacional à crise sentida no nosso país leva a que os estaleiros da Lisnave redefinam uma nova estratégia. Essa estratégia consiste na inovação em novos materiais, processos e metodologias.

O processo de soldadura por eléctrodos revestidos representa cerca de 95% das soldaduras realizadas na Lisnave e apesar de ser um processo bastante versátil, as taxas de depósito de material e de produtividade são bastante inferiores ao processo por fios fluxados. Surge assim a possibilidade de realizar um estudo ao comportamento deste processo de soldadura em ambiente industrial na Lisnave.

## **1.2. Objectivos**

Esta dissertação tem como objectivo avaliar a possibilidade de utilização de novos processos e materiais de adição, nomeadamente fios fluxados auto protegidos na reparação naval.

Pretendem-se verificar a adequabilidade e características destes novos materiais nas operações de reparação efectuadas na Lisnave.

## **1.3. Estrutura da dissertação**

Este documento está estruturado em quatro capítulos para além deste. No segundo capítulo faz-se uma abordagem ao estado da arte onde é apresentada a actual conjuntura

da indústria naval, descreve-se o processo *FCAW (Flux Cored Arc Welding)* , a influência da variação dos parâmetros de soldadura e os problemas de soldabilidade do aço carbono S355J2+N, um aço considerado equivalente ao EH36 pela DNV, de acordo com os requisitos da aplicação.

No terceiro capítulo descrevem-se os métodos experimentais adoptados na qualificação do processo de soldadura tendo como base a norma NP EN ISO 15614-1, que especifica e qualifica procedimentos de soldadura para materiais metálicos.

No quarto capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados dos ensaios realizados na qualificação do processo de soldadura.

No quinto Capítulo apresentam-se as conclusões do trabalho efectuado.

## 2. Estado da arte

A indústria nacional de reparação naval depara-se com problemas de competitividade internacional, nomeadamente pelos países detentores de mão de obra barata. Para responder às necessidades é necessário inovar em novos processos e/ou consumíveis.

Os fios fluxados apesar de não serem muito recentes, não têm sido aplicados neste sector e assim surgiu a possibilidade de realizar este estudo num ambiente industrial, na Lisnave.

### 2.1. Indústria naval: Evolução e actual conjuntura

A crescente competitividade empresarial existente nos dias de hoje leva as empresas a adquirir uma postura diferente face ao mercado. A concorrência dos países que têm como maior trunfo a abundância de mão-de-obra barata tem levado à proliferação de uma crise industrial nos países onde os custos de mão-de-obra são muito superiores.

Países como a China, Índia e Coreia do Sul têm invadido os mercados internacionais com produtos a preços muito inferiores aos praticados por países ditos mais desenvolvidos, colocando as suas empresas em situação delicada.

Cerca de 80% da produção mundial de navios é assegurada por países asiáticos que possuem uma carteira de encomendas de cerca de 90% das encomendas mundiais.

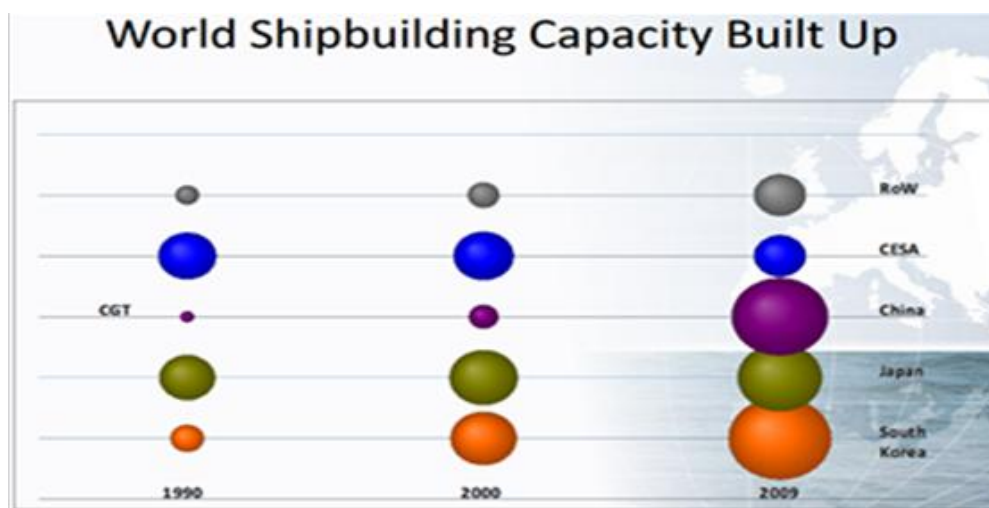


Figura 2.1 - capacidade mundial em construção naval [1, 2].



Apesar da crise, a estratégia traçada por algumas empresas a operar em áreas afectadas pela concorrência dos países detentores de mão-de-obra barata, tem levado ao seu sucesso económico. A estratégia passa pela diferenciação do produto em termos qualitativos como factor determinante para a captação de novos clientes/mercados.

Os estaleiros portugueses também vão sendo afectados pela crise, embora em menor escala, sendo os estaleiros de pequena e média dimensão, os mais afectados. Os estaleiros de dimensão PME já registavam uma redução do volume de negócios em 2008, depois de um período de forte crescimento nos seis anos anteriores.

No entanto, este sector tem vantagens competitivas em particular na reparação naval devido à localização geográfica privilegiada, pelo facto de ao largo de Portugal cruzarem as principais rotas mundiais de transporte marítimo como se ilustra na figura 2.02.

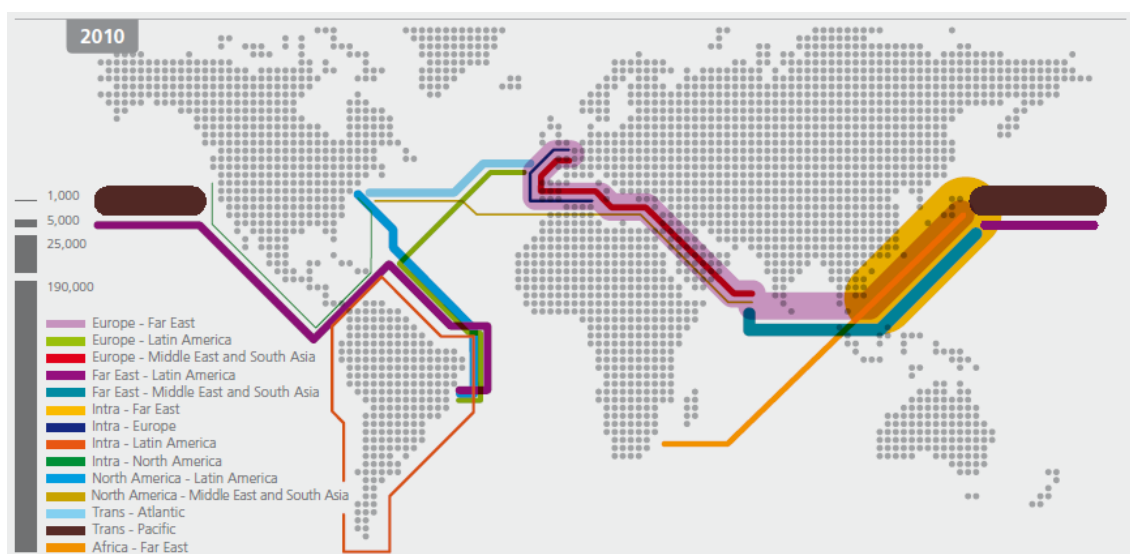


Figura 2.2 - Principais rotas de comércio [3].

O abandono da construção por parte da Lisnave deixou os Estaleiros Navais de Viana do Castelo, como o último construtor nacional capaz de construir navios de médio porte. Com a crise sentida no sector da construção, os estaleiros portugueses optaram por redefinir as suas estratégias no sentido de operar no mercado da manutenção naval.

Esta foi a opção da Lisnave, outrora os maiores estaleiros de construção naval em Portugal, agora uma empresa totalmente dedicada à reparação/manutenção, assumindo o seu lugar como um dos quatro maiores estaleiros europeus a operar na área da reparação naval.

A estratégia das empresas nacionais do sector, terá de passar pela dinamização da indústria, reorganizando e modernizando tecnologicamente os estaleiros nacionais, em particular os de dimensão PME.

O desenvolvimento de tecnologias através da criação de novos produtos, novos materiais, protótipos de novos equipamentos para navios e de embarcações mais eficientes em termos energéticos e ambientais será um dos desafios para os estaleiros e indústria auxiliar nacional.

Depois de um forte crescimento a nível mundial durante cinco anos, onde a procura quadruplicou, verificou-se uma redução das novas encomendas para construções para cerca de metade em 2008.

Pela Figura 2.3, constata-se que a carteira de encomendas no início de 2012 desceu ao nível de 2005, consequência da procura ter sido inferior à produção, tendo-se verificado uma queda de 42,8 % nos últimos três anos.

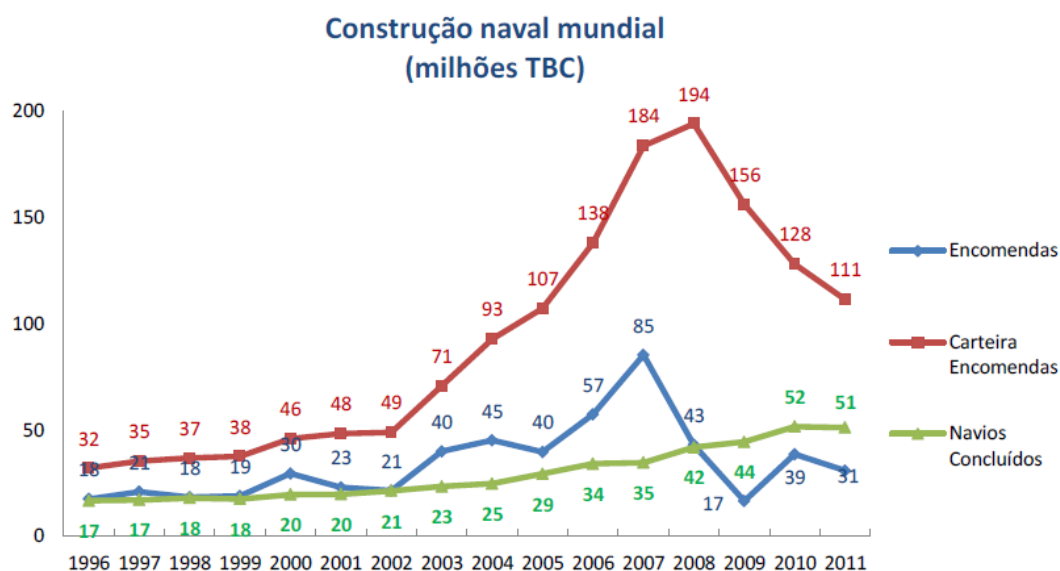


Figura 2.3 - Evolução mundial da construção naval [1, 4].

Segundo a CESA (*Community of European Shipyards Associations*), no final de 2008 o valor da carteira de encomendas caiu para 10.4 milhões de CGT (*Compensated Gross Tonnage*) e atingiu em 2010 o valor mais baixo desde 1990. A crise atingiu sobretudo os navios *standard*, tendo levado vários estaleiros a situações de falência.

A carteira de encomendas caiu 66,5% entre 2008 e 2011 (Figura 2.4), o que levou os produtores europeus a concentrarem-se em nichos de mercado exigentes de elevada tecnologia, a apelarem através da CESA a uma acção a nível europeu que evite danos

estruturais principalmente em PME's e tecnologicamente menos evoluídas no âmbito do projecto *LEADERSHIP 2015* [5], onde se defende o incentivo a políticas de financiamento inovadoras, à defesa de uma política de concorrência equitativa, à renovação da frota que necessita ser substituída e a novas formas de colaboração na inovação tecnológica.

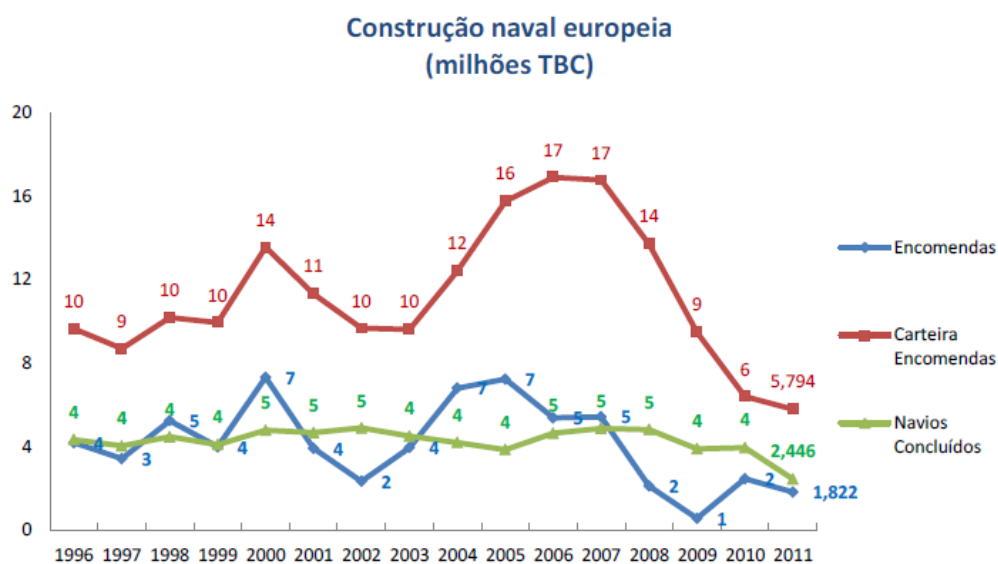


Figura 2.4 - Evolução Europeia da construção naval [4].

Em Portugal, o sector de construção naval também não é brilhante. A carteira de encomendas é apreciável mas a produção em milhares de toneladas brutas compensadas não tem significado (Figura 2.5).

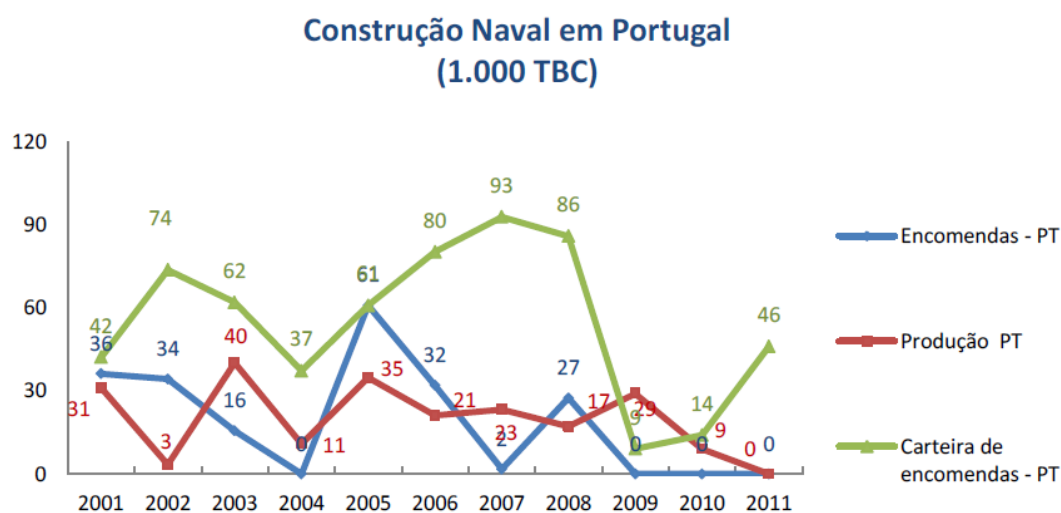


Figura 2.5 - Evolução portuguesa da construção naval [4].

A manutenção e reparação efectuada em estaleiros de grande dimensão como a Lisnave e os estaleiros de Viana do Castelo são a actividade predominante em Portugal, apresentando em 2008, 66% do volume de negócios (Figura 2.6). A análise dos últimos seis anos evidencia uma tendência de crescimento da reparação superior à da construção naval [4, 6].

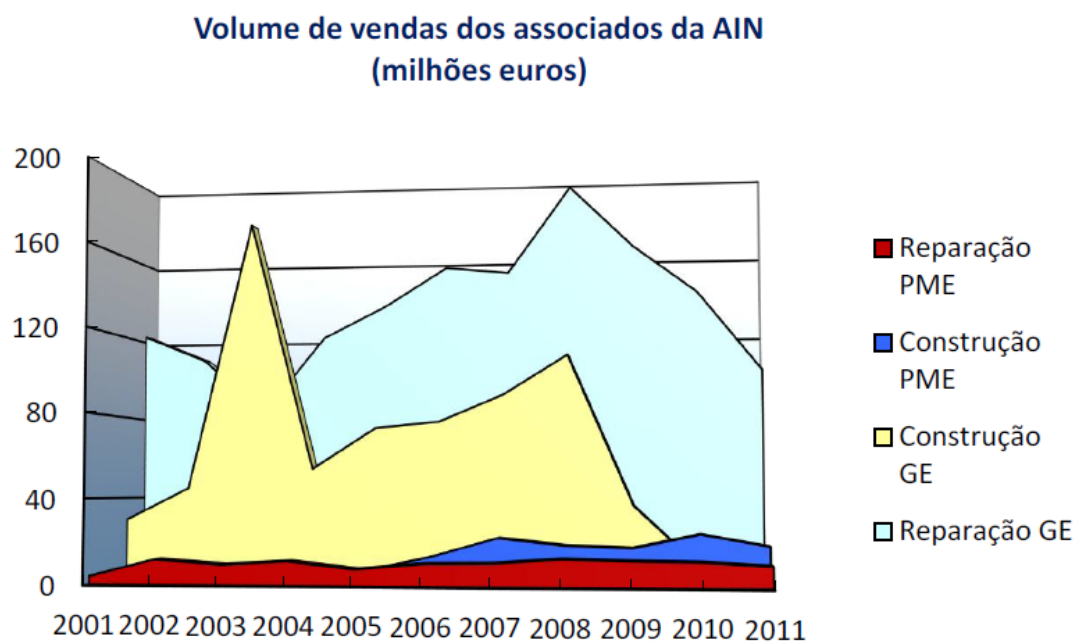


Figura 2.6 - Volume de vendas dos estaleiros do universo AIM ( milhões de euros ) [6].

## 2.2. Soldadura com fios fluxados (FCAW)

### 2.2.1 Descrição do processo

Nos anos 50, trabalhos realizados no *E.O. Paton (Electric Welding Institute)* mostraram que o uso de fios fluxados (FCAW) para soldadura e revestimentos seria promissor, com o aparecimento do primeiro fio fluxado auto-protégido em 1958.

Desde o início dos anos 70 que a soldadura com fios fluxados tem demonstrado ser uma via promissora para a mecanização e automação dos processos de soldadura por arco eléctrico onde a fusão dos materiais é conseguida pelo aquecimento até à temperatura de fusão do MB (material base) e consumível sem recurso a pressão externa. Por ser um processo que pode ser mecanizado ou automatizado, tem sido cada vez mais utilizado na soldadura de materiais ferrosos, nomeadamente na indústria naval, maquinaria pesada, na construção de estradas, transportes, estruturas metálicas, na construção de centrais nucleares e em muitas outras aplicações industriais [7, 8].

Utiliza como consumível um fio continuo enrolado numa bobine, tal como no processo MIG/MAG ou em SAW (*Submerged Arc Welding*), mas que difere destes pela particularidade do consumível apresentar uma geometria tubular em que no seu interior se encontra um fluxo ou uma mistura de fluxo com pó metálico que contém elementos que na fusão, queima e vaporização, garantem a protecção do arco eléctrico, do banho de soldadura pela formação de escória e da contaminação atmosférica [7-10].

O revestimento do fio constitui o material a depositar.

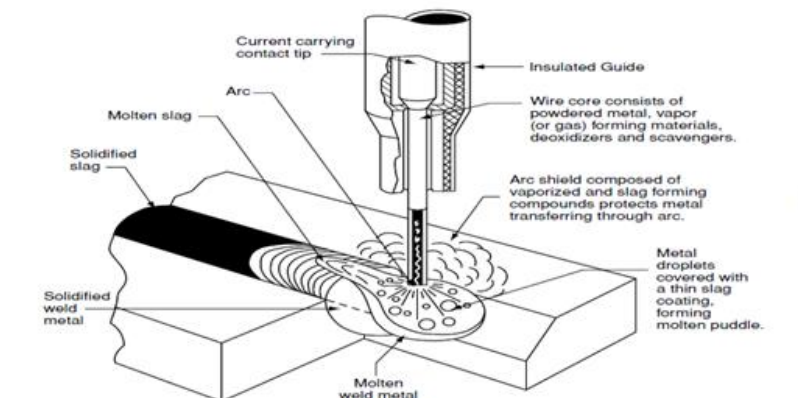


Fig.2.7 - Processo de soldadura com fio fluxado auto protegido (114) [11].

### 2.2.2. Variantes do processo

Existem duas variantes no processo *FCAW* que se distinguem pela forma com que o arco eléctrico e o banho de fusão são protegidos da contaminação atmosférica.

1. **Fios fluxados com protecção gasosa (136)**
2. **Fios fluxados autoprottegidos (114)**

No primeiro caso a fusão, queima e vaporização do consumível e, conseqüentemente, dos seus elementos constituintes não garantem a protecção total do arco eléctrico e do banho de fusão da contaminação atmosférica necessitando de uma protecção adicional tal como no processo de MIG/MAG [7, 8].

Essa protecção é obtida recorrendo a uma fonte gasosa externa. Os gases mais utilizados são o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) como gás activo, o hélio (He) e argon (Ar) como gases inertes, ou uma mistura destes gases consoante as condições desejadas, ou ainda com base nas especificações do fabricante de consumíveis [7, 8, 12].

No segundo caso essa protecção é totalmente conseguida pela fusão, queima e vaporização do consumível e dos seus elementos constituintes tal como na soldadura por eléctrodos revestidos [7-9].

Os cordões de soldadura nestes processos apresentam-se parcial, ou totalmente, cobertos por uma camada de escória que protege o cordão durante o arrefecimento.

Investigações realizadas sobre a eficiência da protecção do metal durante a soldadura mostraram que se conseguia obter qualidades elevadas nas situações em que é necessário soldar em locais muito ventosos [7, 8].

A gama de aplicações dos fios fluxados para a soldadura de aços carbono e de baixa liga, incluem fios com núcleo rutílico e básico, que são utilizados em condições de estaleiro, locais com vento. A utilização dos fios fluxados na soldadura de aços austeníticos e austeno-ferríticos possuem grandes vantagens técnicas e económicas na reparação de ferros fundidos com grafite lamelar e esferoidal entre outros casos [7, 8].

### 2.2.3 Vantagens e desvantagens do processo

#### Vantagens

O processo de FCAW apresenta várias vantagens em relação aos processos de soldadura GMAW ou SMAW tais como:

1. Maior produtividade que em SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*), através da utilização de um consumível contínuo o que normalmente se traduz numa redução dos custos em 50% a 70%, quer por evitar desperdícios de material, quer por eliminar tempos mortos na troca de eléctrodos [7-10, 13].
2. Benefícios metalúrgicos conseguidos pela possibilidade de adicionar elementos de liga ao fluxo contido na alma do consumível, adaptando o processo às necessidades tornando-o um processo bastante versátil [7, 8].
3. Permite obter maiores rendimentos, penetração e menor quantidade de defeitos de fusão através da utilização de maiores densidades de energia do que em GMAW (*Gás Metal Arc Welding*) e SMAW [7-10, 13].
4. Menor experiência exigida ao operador do que em GMAW [8-10, 13].
5. Pelo facto de a protecção do banho ser garantida pela queima do consumível, ao contrário do processo GMAW, é possível usar um comprimento de *stick-out* maior sem haver interferências causadas pelas correntes de ar na soldadura, o que permite soldar ao ar livre com maior produtividade e qualidade mesmo quando comparado com SMAW [7-9].
6. Automatizável, utiliza corrente continua directa [7-9].
7. Solda em todas as posições, juntas de canto ou topo a topo, em chapas e em tubos o que lhe confere boa capacidade para trabalhos de fixação de vários componentes com diferentes geometrias [7-10, 13].
8. Boas características de arco [7, 8].
9. Baixo nível de salpicos mesmo usando como gás de protecção, 100% de CO<sub>2</sub> [7, 8].
10. Dispensa o uso, transporte e reparação/manutenção de equipamentos de fluxo como botijas de gás, tubos e equipamentos de medição, conferindo uma maior mobilidade, acessibilidade a locais mais adversos e confinados e uma redução de custos comparado com GMAW [7-9].

11. Maior tolerância à existência de óxidos de superfície que GMAW [10, 13].
12. Processo mais simples e versátil que SAW [10, 13].
13. Superfície de cordão com boa aparência e bom padrão de qualidade radiográfica [10, 13].

## **Desvantagens**

Algumas desvantagens no processo FCAW podem ser apontadas tais como:

1. Devido à necessidade de equipamento pesado (máquina de soldadura), a acessibilidade e mobilidade é uma grande desvantagem face ao processo SMAW [8, 9].
2. Apresenta escória que cobre parcialmente ou totalmente o cordão de soldadura e que tem de ser retirada antes da execução de um novo cordão como acontece em SMAW [7-9].
3. Custos dos consumíveis e equipamento elevados quando comparados com SMAW [7-9].
4. Maior conhecimento do operador, supervisor e engenheiro de soldadura a fim de garantir a melhor qualidade do processo.
5. Estudos ao impacto ambiental na reparação do casco de um navio mostraram que o processo FCAW é 85% mais perigoso que o processo SMAW para a saúde do operador por apresentar maiores elementos cancerígenos presentes nos fumos libertados. Apesar de o processo FCAW apresentar um rácio de libertação de fumos menor que o processo SMAW, por se tratar de um processo contínuo, a quantidade total de fumos libertados acaba por ser maior [14].
6. Risco de inclusões de escória e falta de penetração na raiz do cordão [13].



## 2.3 Parâmetros do processo de soldadura e consequências da sua manipulação

### 2.3.1. Intensidade de corrente de soldadura / velocidade da alimentação de fio

Para um determinado tipo de consumível, diâmetro e *stick-out* a utilizar durante a soldadura, a intensidade de corrente eléctrica é proporcional à velocidade de alimentação do fio consumível [7-9].

Com o aumento da intensidade de corrente, aumenta a profundidade de penetração [8, 10, 13] e a percentagem de diluição devido ao aumento da densidade de corrente e à taxa de depósito por unidade de tempo. Também com o aumento da intensidade de corrente o arco eléctrico torna-se mais rígido e quente [13].

T. Kannan e N. Murugan [13, 15] estudaram o efeito da variação dos parâmetros de soldadura com o processo FCAW num aço inoxidável duplex e mostraram que a largura de cordão aumenta com o aumento da intensidade de corrente.

Ghazvinloo e Honarbakhsh demonstram também que com o aumentando da intensidade de corrente há uma redução da tensão de rotura e de cedência no cordão [15]. Mohamat, Ibrahim, Amir e Ghalib [9, 10, 16] mostram que o aumento da intensidade eléctrica diminui também a dureza no cordão de soldadura devido às mudanças no tamanho de grão da microestrutura. Com esse aumento da intensidade, junto à linha de fusão, o material de base atinge temperaturas cada vez mais acima da sua temperatura de sobreaquecimento resultando num grão grosso por epitaxia.

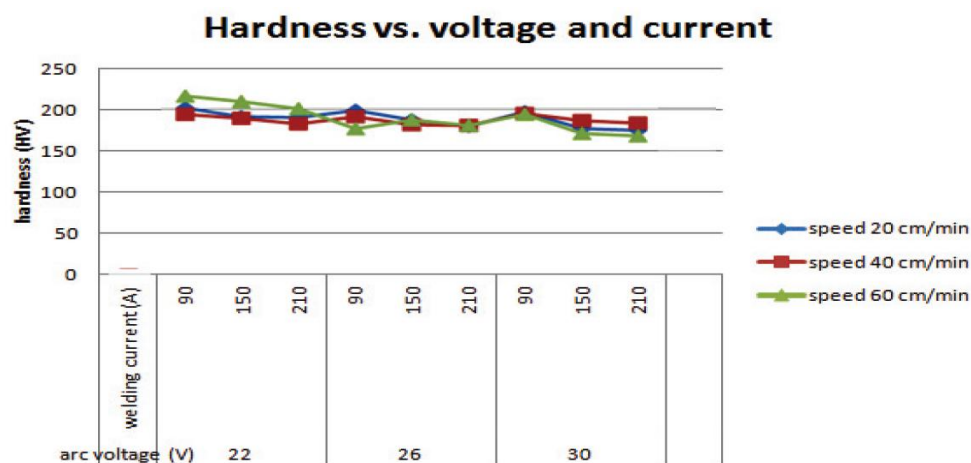


Figura 2.8 - Gráfico Dureza vs intensidade de corrente para uma velocidade de soldadura de 20, 40 e 60 cm/min. [10].

Em caso de Intensidades de correntes excessivamente elevadas, é produzido um arco de escavação e estreito que resulta em cordões de soldadura convexos e de fraca aparência. Por outro lado, Intensidades muito baixas produzem um arco instável com transferência de metal depositado por grandes gotas e salpicos excessivos [8, 9].

Também pode ocorrer captação de azoto e porosidades no metal de soldadura [9].

Com fio nu, para garantir uma boa estabilidade do arco eléctrico, à semelhança do processo MIG/MAG, a alteração da intensidade da corrente eléctrica terá de ser acompanhada pela alteração da tensão no arco eléctrico. Assim, para se obter uma boa regulação do equipamento e, consequentemente, um arco eléctrico estável tem de haver uma boa relação da intensidade de corrente com a tensão do arco [7, 8].

### 2.3.2. Tensão do arco eléctrico

A tensão do arco eléctrico está directamente relacionada com o seu comprimento e variam na razão directa.

Consequentemente o aspecto do cordão de soldadura (convexidade, salpicos, molhagem e porosidade) são alguns factores influenciados pela tensão do arco eléctrico [7, 8].

Segundo o estudo realizado por Ghazvinloo e Honarbakhsh [15], ao se aumentar o valor da tensão do arco eléctrico obtêm-se cordões mais largos. Mostram também que esse aumento é responsável por um decréscimo da tensão de rotura e de cedência no cordão de soldadura.



Figura 2.9 - Influência do valor da tensão eléctrica na largura de cordão num aço de baixo carbono com o processo *FCAW* com protecção gasosa. a) 26 V, b) 30 V e c) 34 V [15].

O aumento da tensão do arco eléctrico mantendo-se os valores de corrente e velocidade de soldadura constantes produz um cordão suave e largo, tende a reduzir porosidades causadas por corrosão, ajuda a fechar a raiz quando a distância é excessiva, aumenta a captação de elementos de liga a partir de um fluxo de liga [8].

Para melhorar a molhagem e evitar a obtenção de cordões convexos deve-se sempre que possível trabalhar com tensões de arco elevadas [7].

No entanto, se o comprimento de arco for excessivo pode provocar um cordão muito largo, tornando-o susceptível a fissuração, promove uma dificuldade acrescida na remoção da escória, produz um cordão concavo susceptível a fissuração, diminui a molhabilidade [8].

Valores de tensões muito elevadas podem também originar salpicos e um cordão de forma irregular [7].

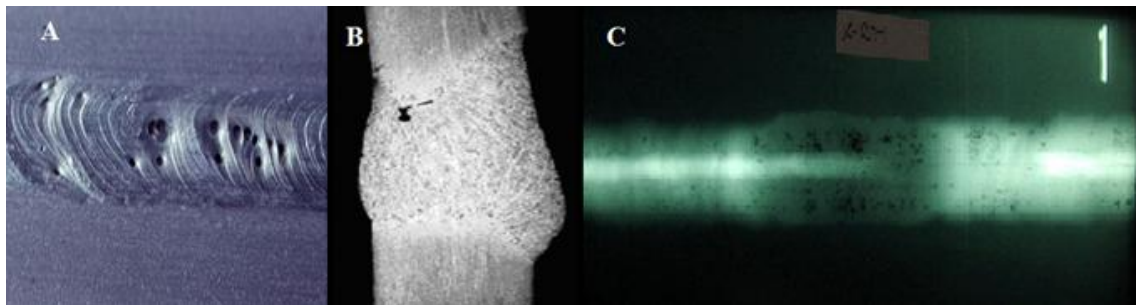


Figura 2.10 – Porosidades A) à superfície, B) no Interior do cordão e C) visíveis a raio-X [17, 18].

No caso dos fios fluxados auto protegidos deve-se trabalhar com menos 2 a 3 V do valor de tensão utilizado com fios com protecção gasosa, a fim de evitar a entrada de azoto na forma de nitretos no metal fundido o que dá origem a cordões com más características mecânicas. Tensões de arco muito baixas originam normalmente cordões muito convexos e com fraca penetração [7].

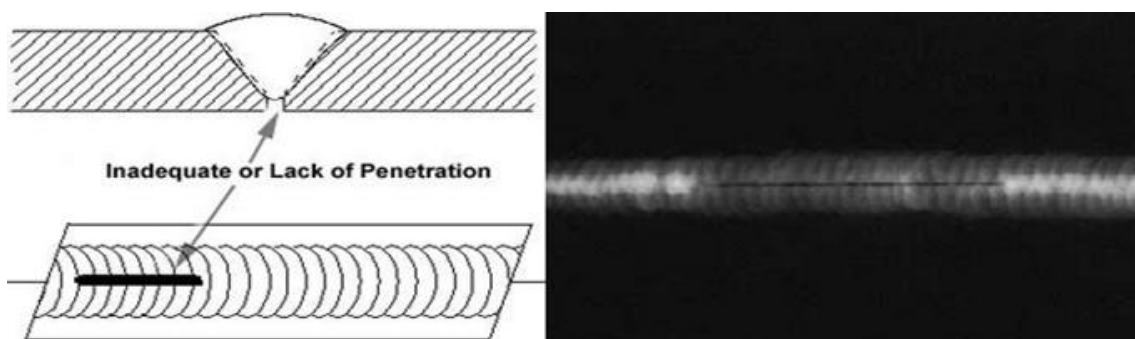


Figura 2.11 - Falta de penetração [19].

### 2.3.3. Extensão livre de eléctrodo (“*Stick-out*”)

Uma das grandes diferenças operatórias entre os fios auto-protegidos e os fios com protecção gasosa está na possibilidade de nos primeiros se poder utilizar extensões de eléctrodo (*stick-out*) maiores que 20 mm. Dependendo do fabricante, consumíveis e aplicações, as extensões podem variar entre os 19 e os 95 mm. Uma vez que a protecção é feita na ponta do eléctrodo na altura da queima, esta extensão permite trabalhar com montagens irregulares ou imprecisas sem que ocorra o risco de se obter uma protecção deficiente do banho de soldadura.

A utilização do “*stick-out*” permite para o mesmo valor de tensão e corrente que o aquecimento do fio por efeito de Joule seja superior devido ao aumento do comprimento resistivo, podendo desta forma reduzir-se o valor de tensão do arco e corrente eléctrica. Leva portanto, a uma menor entrega térmica ao material de base, originando cordões mais estreitos e sem grandes convexidades, permitindo deste modo a adequação do processo à soldadura de componentes com montagens e preparações deficientes [7, 8].

T. Kanann e N. Murugan [13] demonstraram que com o aumento do *stick-out* e consequentemente o aumento da resistência térmica, a redução da intensidade de corrente conduz a uma redução da penetração do arco e portanto, a uma redução da diluição. Demonstraram também que com o aumento do *stick-out* o comprimento de arco aumenta e como já foi dito, a largura do cordão também aumenta devido à maior amplitude de área do arco na superfície da soldadura.

Para *stick-out's* demasiado grandes pode ocorrer salpicos, cordões convexos e falta de penetração. Pelo contrário, se o *stick-out* for demasiado pequena pode originar falta de protecção gasosa e consequentemente porosidades.

No caso de diminuição do *stick-out* por aumento da altura do arco pode originar porosidades, oxidação do banho, salpicos entre outros defeitos na soldadura [7, 8].

Com o aumentando ou diminuição do comprimento de *stick-out*, aumenta ou diminui a taxa de depósito [7].

### 2.3.4. Velocidade de soldadura

A velocidade de soldadura determina a qualidade de penetração, a morfologia e microestrutura do cordão [7, 8, 10].

T. Kanann e N. Murugan [13] demonstram que com o aumento da velocidade de soldadura diminui a largura do cordão. Pelo facto da velocidade ser maior, há uma redução do calor envolvido e consequentemente da taxa de depósito por unidade de comprimento. Esse aumento conduz a uma maior penetração e percentagem de diluição desde que a taxa de material depositado por unidade de comprimento diminua com a secção do cordão.

Por outro lado, pela literatura e pelo estudo realizado por Ghazvinloo e Honarbakhsh, a penetração total é conseguida dentro de uma gama de valores de velocidade que quando não é satisfeita, isto é, quando a velocidade é superior ou inferior a essa gama, pode ocorrer penetrações menores [7, 8, 10, 15].

Também para valores de velocidade elevadas ou reduzidas com uma intensidade de corrente elevada pode originar bordos queimados e ocorrência de inclusões de escória [7, 8].

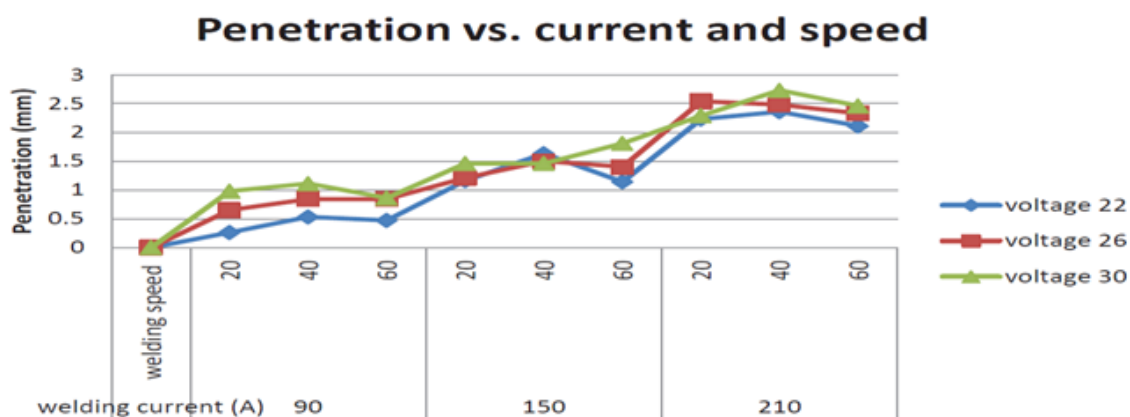


Figura 2.12 - Efeito da intensidade de corrente eléctrica e da velocidade de soldadura na penetração para a) 20cm/min., b) 40cm/min. e c) 60cm/min. [10].



Figura 2.13 - Efeito da velocidade de soldadura na largura de cordão para a) 40cm/min., b) 50cm/min. e c) 60cm/min. [15]

Segundo Mohamat, Ibraim, Amir e Ghalib [10], para a mesma intensidade de corrente e tensão, com o aumento da velocidade de 20cm/min para 60cm/min, há um decréscimo do tamanho de grão e um aumento de produção de martensite.

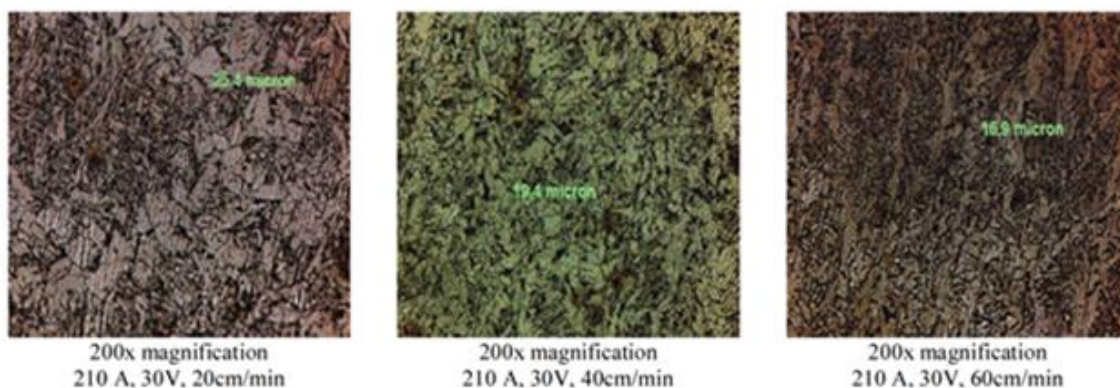


Figura 2.14 – Variação da microestrutura do cordão de soldadura com o aumento da velocidade de soldadura [10].

Também para valores de velocidade elevadas ou reduzidas com uma intensidade de corrente elevada pode originar bordos queimados e ocorrência de inclusões de escória [7, 8].

### 2.3.5. Taxa de depósito

A taxa de depósito é a quantidade de metal fundido por unidade de tempo e aumenta na proporção directa com o aumento dos parâmetros de soldadura já apresentados.



## 2.4. Aplicações

Pelo facto de os fios fluxados apresentarem as vantagens já mencionadas anteriormente, a possibilidade de adaptar o tipo de fluxo à aplicação desejada ao longo dos anos tem aberto portas a este processo para cada vez mais áreas industriais tais como a indústria naval tanto na manutenção/reparação como na construção, na construção e manutenção de maquinaria pesada, na fabricação de aparelhos de elevação, nos motores agrícolas, na construção de centrais nucleares etc. Na Indústria naval este processo tem sido estudado ao longo destes últimos anos e a sua aplicação tem vindo a aumentar. De seguida serão apresentadas duas aplicações no âmbito da construção e reparação naval/offshore.

### 2.4.1. Transportadoras de produtos químicos em cisternas de aço duplex

Transportadores de produtos químicos em cisternas de aço duplex têm sido construídos ao longo destes últimos 25 anos. Apesar da procura por este tipo de transportadoras inicialmente ter sido reduzida, hoje essa procura cresceu e tende a aumentar (apesar de a produção por ano ainda ser limitada). Essa limitação é sobretudo devido aos problemas inerentes ao processo de soldadura em aço duplex na construção de estruturas de grandes dimensões. Por essa razão apenas alguns estaleiros construtores arriscam construir transportadores de produtos químicos em cisternas com este tipo de aço. São exemplos de produtos químicos a serem transportados: produtos de refinaria de petróleo, ácidos, óleos vegetais, óleos animais e melado. Além disso, podem transportar substâncias químicas tais como hexametilenodiamina, n-pentano, i-pentano, naftaleno e ácido fosfórico.

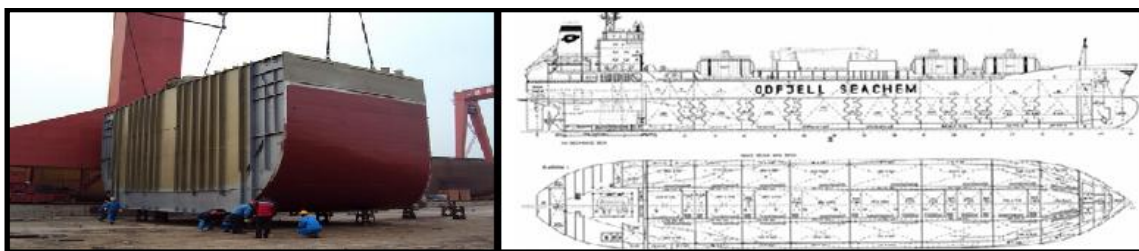


Figura 2.15—Transportadores de produtos químicos em cisternas [20, 21].

O processo FCAW constitui grande parte das soldaduras realizadas durante o processo de construção destas transportadoras, sendo que no caso dos fios com protecção gasosa, essa protecção terá de ser assegurada por gases ou mistura de gases quimicamente activos.

Este processo tem uma elevada importância pela possibilidade da escolha correcta do tipo de consumível e seu fluxo, assim como da escolha do gás de protecção com o intuito de conseguir cumprir os requisitos de projecto tais como: propriedades mecânicas, parâmetros da microestrutura, nível de resistência à corrosão e boas qualidades das juntas soldadas. Pelo facto de no interior dos reservatórios se acomodar produtos químicos, é de extrema importância garantir uma boa resistência à corrosão nas juntas soldadas. Os fios fluxados utilizados nesta aplicação devem conter maiores quantidades de componentes de liga (principalmente de Cr, Ni, N), em comparação com o MB [20].

#### **2.4.2. Soldaduras offshore em sistemas de ancoragem**

No Brasil, a expansão da indústria do petróleo levou a um impulso enorme nas actividades de construção/manutenção offshore uma vez que as maiores reservas petrolíferas brasileiras se encontram em águas mais profundas. Para o efeito é necessário recorrer a plataformas semi-submersíveis que são posicionadas com auxílio de um sistema de ancoragem constituído por vários componentes onde se incluem as amarras de aço.

É uma aplicação com requisitos específicos e exigentes na escolha dos materiais adequados devido sobretudo às condições severas de serviço, o que leva a apostar-se em aços temperados e revenidos com limites de resistência entre os 690 e os 1000 MPa. Na Tabela 2.1 é apresentado alguns dos aços utilizados em aplicações offshore mais severas.



Tabela 2.1 - Propriedades dos aços segundo a norma IACS W22 [22]

Grau	LE (MPa)	LR (MPa)	Al (%)	RA (%)	E <sub>cv</sub> à -20°C (J)
R3	410	690	17	50	40
R3S	490	770	15	50	45
R4	580	860	12	50	50
R4S	700	960	12	50	56
R5	760	1000	12	50	58

Nota: LE – limite de escoamento; LR – limite de resistência; Al –alongamento;  
RA – redução de área; E<sub>cv</sub> – energia Charpy-V.

A exigência nas propriedades mecânicas dos aços para aplicações *offshore* torna o processo de soldadura um grande desafio em termos quer de procedimentos de soldadura como e principalmente na selecção e/ou desenvolvimento de consumíveis adequados para a aplicação.

Através de um estudo comparativo entre o processo SMAW e FCAW em aços de alta resistência para aplicações offshore em equipamentos de ancoragem, verificou-se que em ambos os processos os requisitos são cumpridos embora a opção recaia mais sobre os eléctrodos revestidos pela maior tenacidade ao impacto a baixas temperaturas apresentado comparado com o processo FCAW. Esta diferença pode ser atribuída à ocorrência de uma microestrutura mais grosseira, resultado do menor número de passes necessário com o processo FCAW [23].

## **2.5. Problemas de soldabilidade**

A aptidão que um dado material apresenta à operação de soldadura é definida como a sua soldabilidade. A soldabilidade de um aço depende da sua composição química e propriedades mecânicas. Para os aços, a soldabilidade é tanto menor quanto maior a dureza e a temperabilidade [9].

O material base deste estudo é o S355J2+N, um aço carbono equivalente ao EH36 e para este material são apresentados os possíveis problemas inerentes à soldadura, as suas causas e as formas de evita-los.

### **2.5.1. Fissuração a frio**

A fissuração a frio ocorre quando em simultâneo estão presentes três factores: Presença de hidrogénio no material depositado, elevado nível de tensões na junta e microestruturas duras e frágeis (martensite), podendo ocorrer sob o cordão, na ligação ou na raiz, sempre na ZTA [16, 24, 25].

A fissuração a frio pode ser evitada com uma escolha correcta, quer do processo de soldadura, quer dos MA e/ou gás de protecção. O uso de MA com altos teores de hidrogénio, sujos e húmidos são desaconselhados. Deve-se ter em conta a escolha de um MA austenítico e com baixa resistência diminuindo desta forma tanto o nível de tensões na ZTA (Zona Térmicamente Afectada) como a dissolução do hidrogénio presente no processo. A norma NP EN 1011-2+A1 apresenta uma escala de hidrogénio para cada processo e deve ser consultada na escolha do processo.

O pré-aquecimento, pós-aquecimento e o aquecimento entre passagens são utilizados e destinam-se a diminuir a velocidade de arrefecimento de uma soldadura, a fim de modificar a microestrutura, ou seja, diminuir a dureza na ZTA. Este tipo de tratamento facilita, também, a difusão de  $H_2$  e, ao mesmo tempo, diminui o nível e melhora a distribuição das tensões residuais na junta e o teor de martensite formada [16, 24, 25].

Juntas de canto requerem uma maior temperatura de pré-aquecimento em relação a uma junta topo a topo uma vez que a sua espessura combinada é maior e, por conseguinte, a dissipação de calor é mais rápida [25].

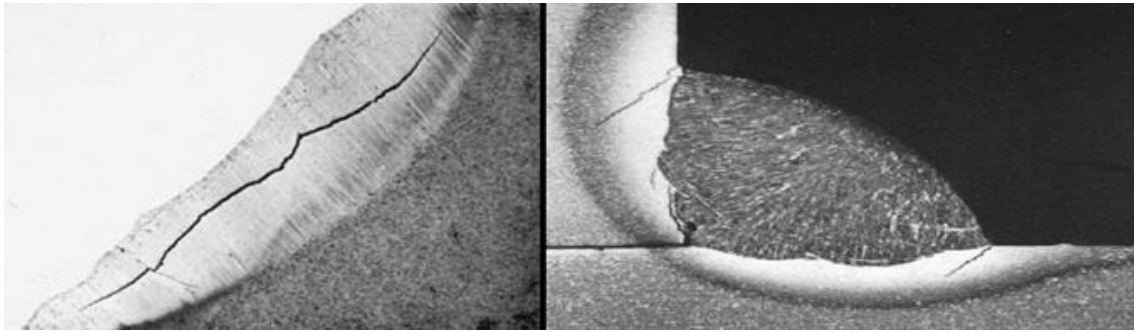


Figura 2.16 – Aspecto de fissurações a frio [24].

### 2.5.2. Fissuração a Quente

A fissuração a quente apesar de ser mais frequentemente observada em peças fundidas e lingotes, também podem ocorrer em soldadura por fusão.

Este tipo de fissuração está associado à presença de impurezas como o enxofre e fósforo, que causam segregações e que levam à formação de finos filmes líquidos intergranulares, nas etapas finais de solidificação e que ocorrem normalmente ao longo do eixo do metal depositado [16, 24].

A fissura ocorre entre os limites de grão interdendriticos, onde se localiza o último líquido a solidificar do metal fundido e durante a fase terminal de solidificação, quando a resistência às tensões originadas na solidificação desenvolvidas através dos grãos adjacentes exceder a força do metal de soldadura praticamente solidificado [24].

O metal de adição ao solidificar tende a contrair devido à contracção na solidificação e apesar do metal de base nas proximidades também contrair, essa contracção é menor pelo facto de essa zona não ter fundido [16, 24].

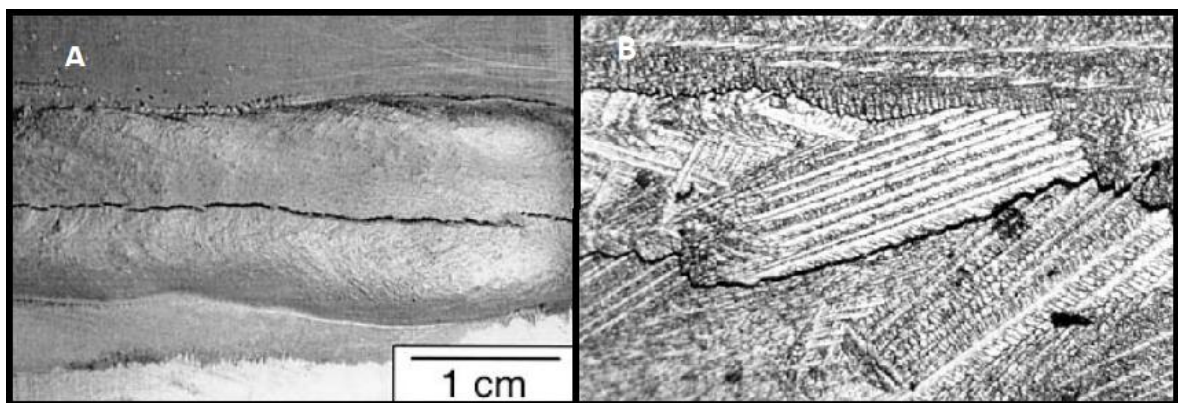


Figura 2.17 - Fissuração a quente A) na soldadura do alumínio 6061 e B) no talão da placa do alumínio 7075 [24].

No caso de soldaduras em aços carbono-manganês, este tipo de fissuração surge, frequentemente, quando se utiliza o processo SAW, menos frequentemente nos processos com protecção gasosa (TIG, MIG/MAG e FCAW com ou sem protecção gasosa) [25].

As causas que promovem este tipo de fissuração podem ser várias tais como [24, 25]:

1. O nível de restrição da junta. Quanto mais severa essa restrição for, menos liberdade a junta soldada terá para acomodar as tensões resultantes da soldadura.
2. Com o aumento da espessura da peça de trabalho, aumenta a probabilidade de fissuração.
3. Geometria do cordão (relação profundidade / largura indesejada)
4. Ductilidade do metal fundido a alta temperatura. Quanto menos dúctil a solidificação for, maior será a probabilidade de fissurar.
5. Impurezas como o enxofre (S) e o fósforo (P) são conhecidas por causarem fissurações a quente em aços de carbono e baixas ligas mesmo quando presentes em baixas quantidades. Estas substâncias formam com o ferro e outros metais, compostos com ponto de fusão inferiores ao restante material, ampliando tremendamente a gama de temperaturas de solidificação.
6. Elevadas diluições. O nível de impurezas e a susceptibilidade à fissuração são normalmente mais elevados nos passes com elevada diluição, como por exemplo o passe de raiz de uma junta topo a topo.
7. Estrutura do grão. Estruturas equiaxiais de grão fino são menos susceptíveis à fissuração a quente comparativamente a uma estrutura colunar de grão grosseiro, pela maior capacidade em acomodar forças de contracção, isto é, maior ductilidade.

Como forma de evitar este tipo de fissuração dever-se-á [24, 25]:

- Utilizar eléctrodos com reduzido teor de impurezas como S e P e uma percentagem elevada de manganês.
- Recorrer a pré-aquecimento e a uma menor restrição da junta promove uma diminuição de tensões.

- Para evitar ou reduzir a fissuração a quente, devem ser evitados MB com composições químicas susceptíveis a este tipo de fissuração.
- Utilizar um tipo de junta e uma entrega térmica adequada para que a diluição seja baixa. (Juntas mais estreitas, ângulo do chanfro, face da raiz e folga)
- Diminuição da velocidade de soldadura.
- Outro factor importante é a maior ou menor capacidade do líquido de molhar os contornos de grão, isto é, a sua capacidade de se espalhar, na forma de filmes finos. O Manganês, tende a globalizar os sulfuretos reduzindo a sua molhabilidade, prevenindo desta forma a fissuração em aços.

### 2.5.3. Arrancamento lamelar e fissuração no reaquecimento

O aço S355J2+N pode apresentar problemas de soldabilidade como o arrancamento lamelar. Este tipo de problemas são frequentemente observados em soldaduras de ângulo [25], mas uma vez que no presente trabalho as soldaduras foram realizadas topo-a-topo, este tipo de problema não requer grande preocupação. Por essa razão não será abordado as suas causas e formas de prevenção.

Nakamura, H., Naiki, T., e Okabayashi propuseram a seguinte fórmula para o efeito dos elementos de liga na susceptibilidade de fissuração no reaquecimento [24]:

$$CS = \%Cr + 3,3 \times (\%Mo) + 8,1 \times (\%V) - 2 \quad (1)$$

E segundo estes, para valores de  $CS \geq 0$ , o aço pode ser susceptível a fissuração no reaquecimento.

Nesta dissertação o material base será o S355J2+N com a composição química apresentada na tabela 3.01 e para este material:

$$CS = 0,06 + 3,3 \times (0,001) + 8,1 \times (0,043) - 2 = -1,58$$

Este aço não apresenta susceptibilidades à fissuração no reaquecimento e por essa razão não serão abordadas as causas e formas de prevenção para este tipo de problema de soldabilidade.

## 2.6. Factores que influenciam a Têmpera em Soldadura

Se uma amostra de aço-carbono austenizada for arrefecida bruscamente até à temperatura ambiente por meio de imersão em água (têmpera), a sua estrutura vai passar de austenite para martensite. A Martensite é uma fase instável que consiste numa solução sobressaturada de carbono dissolvido intersticialmente no ferro CCC ou tetragonal de corpo centrado [42].

A composição química do material tem um papel muito importante na temperabilidade do mesmo, sendo o carbono o elemento que influencia as características da martensite, enquanto os outros elementos, dificultando a difusão deste elemento, influenciam igualmente a temperabilidade do material. A fim de prevenir riscos de fissuração ou de fragilização durante a operação, é necessário conhecer ou prever a temperatura de pré e/ou pós aquecimento [16].

Existem dois critérios de avaliação da temperabilidade de um aço, o critério do carbono equivalente ( $C_{eq}$ ) e o critério da dureza máxima ( $HV_{máx}$ ) [16, 24].

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} \quad (2)$$

(Para aços de baixa liga e de alta resistência )

$$HV_{máx} = 90 + 109C + 47Si + 75Mn + 30Ni + 31Cr \quad (3)$$

O aumento da entrega térmica ou o aumento da temperatura inicial da chapa, infligem um alargamento da ZTA e consequentemente numa redução da taxa de arrefecimento tornando a estrutura menos dura nessa zona. Alguns aços pela sua estrutura química, são susceptíveis de formarem estruturas duras na ZTA, tal que, para evitar esse fenómeno é necessário reduzir a taxa de arrefecimento. O aumento da espessura, aumenta a velocidade de arrefecimento e decresce o tempo de manutenção acima de uma dada temperatura [16;24].

Pode-se calcular a entrega térmica através do quociente entre a potência total da fonte de calor [W] e a sua velocidade de deslocamento [mm/s], dado pela equação [43]:

$$E_T = k \frac{V \times I}{v} \left[ \frac{J}{mm} \right] \quad (4)$$

Onde:

$V$  – Tensão [V]

$I$  – Corrente de soldadura [A]

$E_T$  – Entrega térmica [J/mm]

$v$  – Velocidade de soldadura [mm/s]

$k$  – eficiência térmica (0,8 para o processo *FCAW*)

/

### 3. Procedimento experimental

#### 3.1. Materiais

Neste estudo foi utilizado o aço carbono-manganês S355J2+N, certificado pela DNV para requisitos de impacto a -40°C, dando-lhe equivalência ao aço EH36. O EH36 é um aço pertencente a uma família de aços de alta resistência à tracção, boa tenacidade, alta resistência à corrosão e boa soldabilidade. Trata-se de um aço muito usado na construção naval dado a boa tenacidade a baixas temperaturas e segundo a norma ISO/TR 15608 é um aço que se encontra entre o subgrupo 1.2 e 1.3 com  $275 \text{ N/mm} \leq \text{Re} \leq 360 \text{ N/mm}$  [41].

As chapas de 22 mm de espessura foram cortadas pelas dimensões de  $150 \times 300 \text{ mm}^2$ .

Tabela 3.1 - Composição química e propriedades mecânicas do aço S355J2+N.

Grau	C máx	SI máx	Mn	P máx	S máx	Al min	Ti máx	Cu máx	Cr máx	Ni máx	Mo máx	Nb	V
S355J2 +N	0,13	0,24	1,11	0,01 1	0,005	0,02 2	0,013	0,25	0,06	0,007	0,001	0,001	0,043
	Rm (MPa)		Re (MPa)		A%		Impact test						
	517		359		28,4		Type	Individual values J			Mean value J	E.T. °C	Width of tests piece
								1	2	3			
							ISO- V (L)	110	106	137	118	-40	10×10,0
							ISO- V (T)	86	80	69	78	-40	10×10,0
Re: Yield Strength			A%: Elongation			E.T: Exp. Temperat.			L: Lengthways			T: Crosswise	

De acordo com as equações (2) e (3), calculam-se o carbono equivalente e a dureza máxima deste aço.

$$C_{eq} = 0,13 + \frac{1,11}{6} + \frac{0,06 + 0,001 + 0,043}{5} + \frac{0,007 + 0,25}{15} = 0,35$$

$$HV_{máx} = 90 + 109 \times 0,13 + 47 \times 0,24 + 75 \times 1,11 + 30 \times 0,007 + 31 \times 0,06 = 200,7$$



## Fios Consumíveis

Foram identificados MA indicados para reparação/construção naval, capazes de soldar na posição vertical ascendente garantindo desta forma todas as outras posições.

De entre os consumíveis existentes no mercado foram seleccionados o fio fluxado FLUXOFIL 19 HD com protecção gasosa por CO<sub>2</sub> e o fio Fabshield XLR-8 auto protegido.

Tabela 3.2 - Consumíveis em estudo.

Fabricante	Designação	Classificação	Diâmetro	Gás protecção
OERLIKON	Fluxofil 19HD	E71T-1C-JH4	1,2 mm	CO2
HOBART	Fabshield XLR-8	E71T-8JD-H8	1,6 mm	Não

As Tabelas 3.3 e 3.4 apresentam as composições químicas e as propriedades mecânicas para os dois MA.

Tabela 3.3 - Composição química e propriedades mecânicas do material de adição FLUXOFIL 19 HD.

FLUXOFIL 19 HD								
Composição Química								
C %	Mn %	Si %	P %	S %	Cr %	Mo %	V %	Cu %
0,047	1,218	0,373	0,0013	0,011	0,029	0,003	0,016	0,074
Propriedades Mecânicas								
Ensaio de tracção				Ensaio de Impacto				
Temperatura °C	Re MPa	Rm Mpa	A%	Temperatura °C		Impact strength Joule (charpy-V)		
+20	490	580	27	-30		70		

Tabela 3.4 - Composição química e propriedades mecânicas do material de adição FABSHIELD XLR-8.

FABSHIELD XLR-8					
Composição Química					
C %	Mn %	Si %	P %	S %	Al
0,16-0,21	0,48-0,50	0,14-0,18	0,007-0,009	0,002-0,005	0,49-0,76
Propriedades Mecânicas					
Ensaio de tracção			Ensaio de Impacto		
Temperatura °C	Re MPa	Rm Mpa	A%	Temperatura °C	Impact strength Joule (charpy-V)
+20	485-507	634-636	24-25	-40	70

### 3.2. Equipamentos de soldadura

Os equipamentos utilizados neste estudo para realização das soldaduras foram os seguintes:

1. Tocha e respectivos componentes
2. Bobina com fio FABSHIELD XLR-8
3. Bobina com fio FLUXOFIL 19 HD
4. Garrafa de gás CO<sub>2</sub> (soldadura com fio FLUXOFIL 19 HD)
5. Fonte de potência Kemppi Pro 5200 Evolution
6. Desbobinador Kemppi ProMig 511 com painel MXE (soldadura com fio FABSHIELD XLR-8)
7. Desbobinador Kemppi ProMig 300 (soldadura com fio FLUXOFIL19HD)
8. Máscara e luvas

### 3.3. Ensaio de soldadura

As soldaduras foram realizadas na Lisnave por um técnico certificado da secção de qualificação de soldadores na caldeiraria.

Foram retirados os valores médios de intensidade eléctrica e tensão, calculados os valores de velocidade de soldadura e entrega térmica para cada passe afim de não só possibilitar conhecer os parâmetros ideais nos vários cordões como formar e qualificar futuros soldadores neste processo de soldadura.

Foram realizadas soldaduras topo-a-topo com ambos os MA, as dimensões da junta a soldar são ilustradas na Figura 3.1.

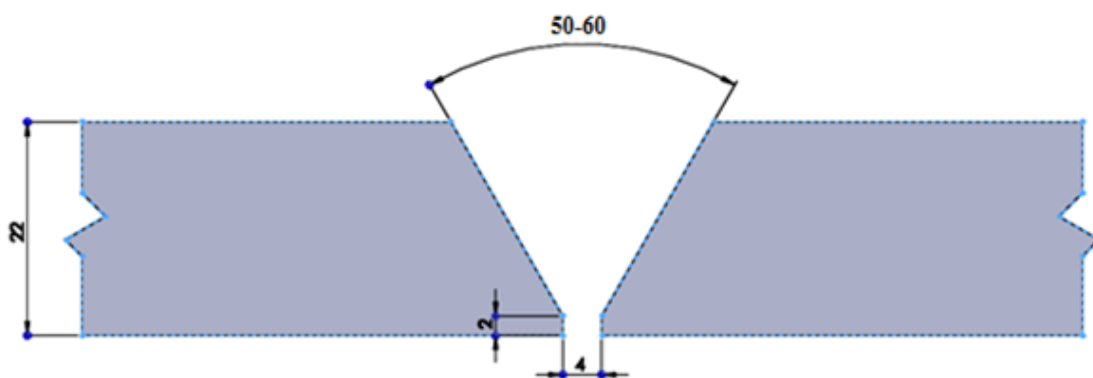


Figura 3.1 - Dimensões em milímetros da junta a soldar.

### 3.4. Ensaio destrutivos e não destrutivos para qualificação

Para a aprovação das construções por parte das entidades classificadoras é necessário certificar as soldaduras segundo a norma EN ISO 15614-1 de 2005, que especifica e qualifica os procedimentos de soldadura para materiais metálicos.

As soldaduras foram realizadas topo-a-topo como ilustra a Figura 3.1 e segundo a norma, o número de provetes deve ser o suficiente para permitir que sejam realizados todos os ensaios requeridos e ter como dimensões mínimas  $150 \times 350$  mm com espessuras iguais em ambas as chapas a soldar e que estão indicadas na Tabela 3.5 [26].

Tabela 3.5 - Inspeção e ensaios dos provetes segundo a norma EN ISO 15614-1 [26].

Corpo de prova		Tipo de ensaio	Designação	Plano de ensaios
Junta topo a topo com penetração total	END	Visual	END	100%
		Radiográfico ou ultra-sons		100%
		Líquidos Penetrantes		100%
	ED	Ensaio de tracção transversal	ED	2 provetes
		Ensaio de dobragem transversal		4 provetes
		Ensaio de impacto		2 conjuntos
		Ensaio de dureza		requerido
		Exame macroscópico		1 provete
END	Ensaio não destrutivo		ED	Ensaio destrutivo

Os provetes foram removidos de locais que garantiam a inexistência de imperfeições dentro dos limites de aceitação para o tipo de ED utilizados e após todos os END terem sido realizados e aceites no critério de inspeção para cada ensaio.

A localização e a forma dos provetes retirados são ilustradas na Figura 3.2.

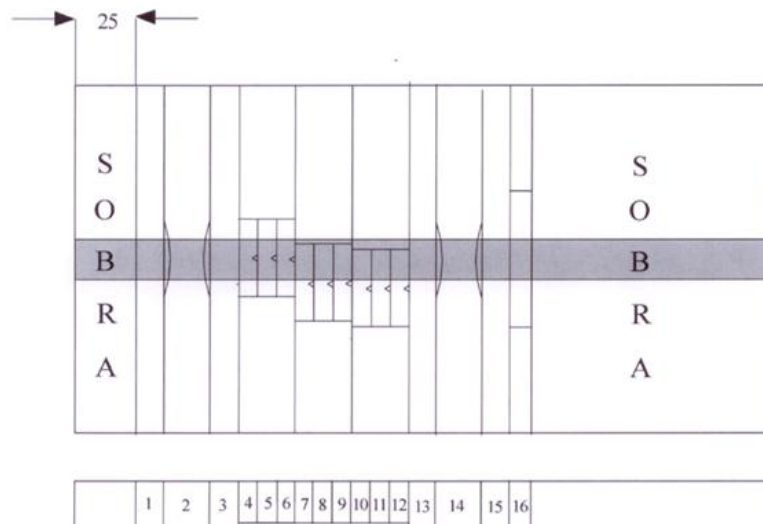


Figura 3.2 - Localização da remoção dos provetes.

Para os ensaios de impacto foram retirados três grupos de provetes para cada soldadura. Um grupo relativo à zona fundida, um à ZTA e um ao MB à distância de 2 mm da ZTA. Um procedimento de soldadura é qualificado se as imperfeições no corpo de prova estiverem dentro dos limites do nível de qualidade B da ISO 5817, excepto para os tipos

de imperfeições como excessos de metal depositado, convexidades, espessuras de garganta e penetrações excessivas, para os quais o nível C deve ser aplicado.

### **3.5. Ensaios não destrutivos (END)**

Tratando-se o S355J2+N de um aço que apresenta alguma susceptibilidade à fissuração a frio, os END foram realizados passado algumas horas após a soldadura, garantindo desta forma a inexistência de fissuras aquando dos ensaios.

Para este estudo, foram realizados ensaios radiográficos para detecção de defeitos internos no cordão de soldadura e o ensaio de líquidos penetrantes para detecção de fissuras superficiais.

A correlação entre os níveis de qualidade da norma ISO 5817 e os níveis de aceitação dos diferentes métodos de ensaios não destrutivos são dados pela norma ISO 17635.

Os ensaios não destrutivos foram realizados no estaleiro da Lisnave.

#### **Inspecção visual da soldadura (EN ISO 17637; EN ISO 5817) [27, 28]**

Os END foram iniciados com uma operação de inspecção visual, pois há situações onde as peças a examinar são rejeitadas no imediato não sendo necessário realizar os ensaios subsequentes. A norma EN ISO 17637 especifica e qualifica o ensaio, cabendo à norma EN ISO 5817 a especificação dos critérios de aceitação.

Uma vez que foi possível obter as condições de acesso e luminosidade óptimas, os equipamentos necessários para a inspecção foram:

- Régua graduada com escala mínima de 1mm.
- Escantilhão de soldadura adequado para medições de soldaduras topo-a-topo em chapa.

A Inspecção visual na preparação da junta teve como objectivo confirmar que:

- A forma e dimensão da preparação dos provetes estava de acordo com a especificação de processo de soldadura.

- As partes a soldar estavam correctamente fixas em relação uma a outra.
- As superfícies a soldar (chanfros e superfícies adjacentes) estavam devidamente limpas.

Inspecção visual durante a soldadura:

- Em cada passe de soldadura efectuou-se uma limpeza com uma rebarbadora com especial atenção à junção entre o metal base e o material de fusão.
- Observou-se a existência de imperfeições visíveis tais como fissuras ou cavidades.

A Inspecção visual depois da soldadura visa verificar:

- A limpeza e o alisamento do cordão de soldadura
- As dimensões do cordão de soldadura como a sua convexidade, regularidade, largura etc.
- A convexidade, regularidade e a inexistência de imperfeições do passe de raiz e da superfície do cordão.

### **Ensaio com líquidos penetrantes (EN571-1 ; EN ISO 23277) [31, 32]**

O ensaio com líquidos penetrantes permite detectar descontinuidades superficiais com recurso a um líquido corante, sejam estas microscópicas ou visíveis à vista desarmada, desde que sejam abertas para a superfície tais como poros, faltas de fusão lateral, fissuras, etc. Pode ser aplicado em todos os materiais sólidos desde que não sejam demasiadamente porosos, isto é, com uma superfície muito grosseira.

O método utilizado foi o ensaio com líquidos penetrantes coloridos removíveis com solvente à temperatura ambiente. A norma europeia EN 571-1 especifica e qualifica o ensaio e a norma EN 23277 define os critérios de aceitação.

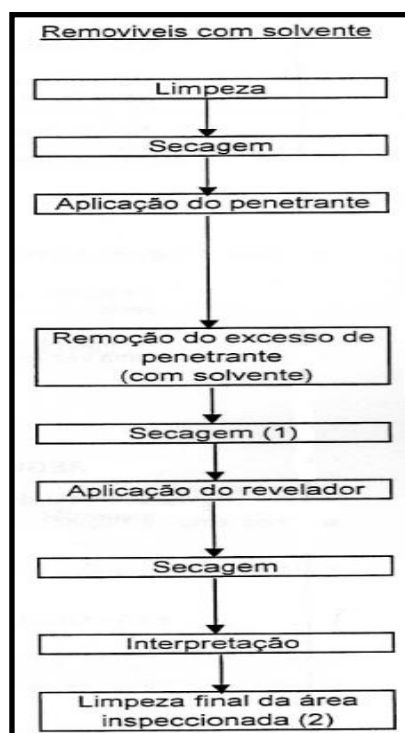


Figura 3.3 - Fluxograma para líquidos penetrantes removíveis com solventes

### Ensaio por radiografia ( ISO 17636-1 ; EN ISO 10675-1 ) [27, 29, 30]

O ensaio por radiografia é um ensaio que permite a detecção de descontinuidades internas em todo o volume do cordão de soldadura através da emissão de radiação. Fornece informações claras e objectivas através de um documento – a radiografia – que pode ser arquivado e posteriormente consultado, quer com o objectivo de acompanhar um defeito conhecido, para estudar a sua evolução e comportamento em serviço, quer como contraprova para a análise de eventuais colapsos ou falhas.

Tem como grande desvantagem, em relação aos ensaios por ultra-sons, a impossibilidade de detectar problemas de laminagem, a posição tridimensional do defeito e a largura em profundidade do mesmo.

A norma ISO 173636-1 especifica e qualifica o ensaio, cabendo os critérios de aceitação à norma EN ISO 10675-1.

Foi utilizada a máquina Andrex Yxlon Smart com um tempo de aquecimento aproximadamente de nove minutos e um filme da IndustrexFilm AA400 Pb ContactPak de dimensões 480 × 100 mm.

A técnica radiográfica utilizada foi a de parede simples, com parâmetros de 160 kV e 4,5 mA com um tempo de exposição de sete minutos e dez segundos.

### **3.6 Ensaios destrutivos**

Os ensaios destrutivos foram realizados na empresa ALSTOM após a realização e aprovação dos ensaios não destrutivos.

Para qualificar o processo em estudo neste trabalho, segundo a norma NP EN ISO 15614-1, foi necessário realizar ensaios de impacto, ensaios de dureza, ensaios de dobra transversal, ensaios de tracção transversal e exame macro / micrográfico.

#### **Inspeção macroscópica / microscópica (ISO 17639) [36]**

A preparação dos provetes e a inspeção macroscópica e microscópica dos mesmos foram realizados no Laboratório do DEMI na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa com o objectivo de observar as características macroscópicas e microscópicas da junta soldada, pelo exame de secções transversais. A inspeção macro foi feita a olho nu e a inspeção micro foi realizada com recurso ao microscópio OLYMPUS CX40 com amplitudes e respectivas escalas de: 50x - 500 µm , 100x - 200 µm , 200x - 100 µm e 500x - 50 µm.

As superfícies das amostras foram lixadas, polidas com pasta de diamante e atacadas quimicamente por uma solução de nital, composta por 95 ml de álcool e 5 ml de ácido nítrico, com um tempo de contraste médio de 20 e 15s, respectivamente. O objectivo destes ensaios foi fornecer informações acerca da estrutura (estrutura de grão, morfologia e orientações, precipitados e inclusões) nos últimos cordões de vista e de raiz, na zona entre passes, na ZTA e no MB.

A norma ISO 17639 especifica e qualifica estes exames.



### Ensaio de tracção transversal ( ISO 4136 ) [34]

O Ensaio foi realizado num corpo-de-prova com 22 mm de espessura, padronizado, para que os resultados obtidos pudessem ser comparados entre si e com a norma. Fixou-se o corpo-de-prova à máquina de ensaios que ao aplicar um esforço crescente contínuo na sua direcção axial levou à rotura do provete. O valor dessa carga aplicada foi medido na própria máquina e após a rotura do provete, as faces da fractura foram examinadas.

Equipamento utilizado no ensaio de tracção: Tinius Olsen Super L 60 ton.

### Ensaio de dobragem ( BS EN ISO 5173 ) [33]

Os ensaios de dobragem são simples e eficazes para detectar problemas metalúrgicos que podem afectar o comportamento dos materiais em serviço ( Figura 3.4 ).

Como o MB tem uma espessura de 22 mm, pela norma NP EN ISO 15614-1, foram retirados quatro provetes com dimensões  $22 \times 10$  mm para ensaios de dobragem lateral à temperatura ambiente.

O diâmetro do madril foi de 4 vezes a espessura do provete e o ângulo de dobragem de  $180^\circ$ .

Durante o ensaio, os provetes não podem revelar qualquer descontinuidade isolada maior que 3 mm em qualquer direcção.

Equipamento utilizado no ensaio de dobragem: Tinius Olsen Super L 60 ton

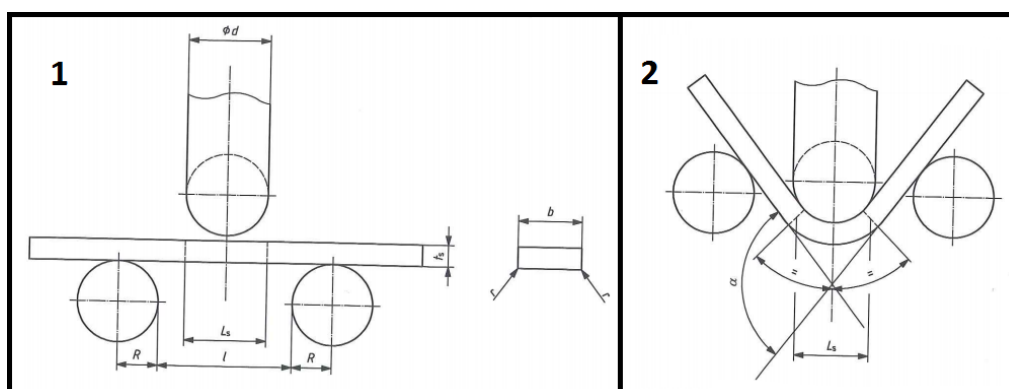


Figura 3.4 - Ensaio dobragem - Dobragem transversal lateral

**Ensaio de impacto (ISO 9016 ; ISO 148-1) [37, 38, 39 ]**

Os ensaios de impacto realizados foram do tipo Charpy V, à temperatura ambiente, que é um dos métodos para determinar a tenacidade à fractura, ou seja, a energia absorvida na rotura de um material.

O ensaio consiste num pêndulo de impacto que é libertado a uma altura pré-defenida, com energia potencial  $K_p$ , causando a ruptura do provete como ilustrado na Figura 3.5 A). A altura de elevação do martelo após o impacto, em comparação com a altura inicial, fornece a medida de energia absorvida pelo corpo de prova, K.

O corpo de prova tem como dimensões 55 mm de comprimento, 10 mm de lado de secção quadrada e uma rugosidade inferior ou igual a 5  $\mu\text{m}$  excepto nas pontas. No centro do provete e na face oposta à face de impacto foi realizado um entalhe em V com 45°, 2 mm de profundidade e com 0,25 mm de raio de curvatura na raiz.

Foram realizados três entalhes perpendiculares à superfície de teste como ilustrado na Figura 3.5 B).

Equipamento utilizado para os ensaios ao Choque: Amsler Otto Wolpert-Werke PW 30/15 S 21 com escala de 0 a 300 Joule. As normas ISO 148-1 e ISO 9016 especificam e qualificam este ensaio.

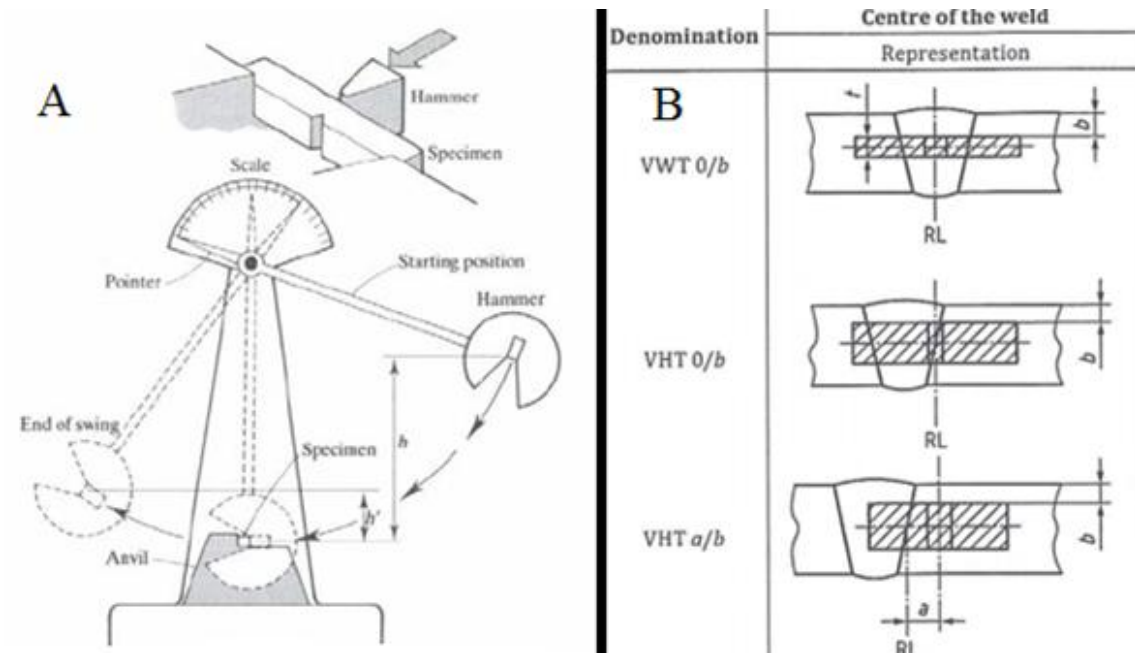


Figura 3.5 - Ensaio de impacto charpy V . A) Representação da máquina para ensaio de impacto charpy e B) localização dos entalhes perpendiculares à superfície de teste [37].

### Ensaio de dureza ( ISO 9015-1 ) [35]

Este ensaio tem como objectivo avaliar a dureza do material e consiste em aplicar uma pressão no provete com recurso a um indentador e a norma ISO 9015-1 especifica e qualifica este ensaio.

O ensaio realizado foi o HV10 (*Hardness Vickers* com aplicação de uma força de 10 kg). As máquinas utilizadas nos ensaios dos provetes retirados das soldaduras com os fios FABSHIELD XLR-8 e FLUXOFIL 19HD foram, respectivamente, a OTTO WOLPERT e a EMCOTEST M4C 025 G3.

A ponta do indentador é uma pirâmide quadrangular em diamante com um ângulo entre faces opostas de 136°.

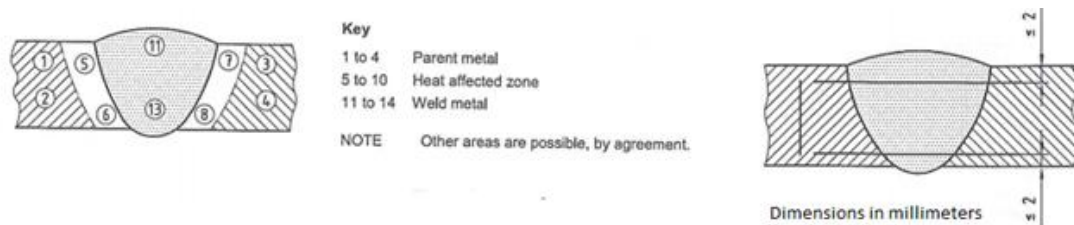


Figura 3.6 - Ensaio de dureza - localização e classificação das zonas de medições no corpo de prova [35].

De acordo com a norma ISO 9015-1, deixou-se uma distância entre o centro da indentação e a ZTA de 1 mm.

Para prevenir a influência da deformação causada por uma indentação, garantiu-se uma distância mínima entre os centros de duas indentações em qualquer direcção de pelo menos 2,5 vezes o tamanho da diagonal do indentador.

## 4. Resultados

### 4.1. Soldadura

Nas Tabelas 4.1 e 4.3 apresentam-se os parâmetros médios da intensidade de corrente, da tensão, da velocidade de soldadura e da entrega térmica calculada para cada passe de soldadura. Nas Tabelas 4.2 e 4.4 são apresentados os mesmos parâmetros médios mas agora nos passes de raiz, de enchimento e de face.

Constata-se que nos passes de raiz e enchimento as entregas térmicas envolvidas na soldadura realizada com o fio autoprotégido são mais elevadas em cerca de 40% enquanto nos cordões de vista as entregas térmicas são semelhantes. Justificam-se esses valores de entregas térmicas mais elevados pela baixa velocidade de soldadura quando comparado com o processo FCAW.

Nas Figuras 4.1 e 4.2 ilustra-se a sequência de passes efectuados em cada um dos processos, sendo possível verificar que na soldadura realizada com o autoprotégido foram necessários catorze passes para unir as peças enquanto no processo FCAW foram necessários vinte e quatro passes. Esta diferença de número de passes é significativa, demonstrando que com o fio autoprotégido se conseguem obter taxas de depósito superiores.

Em termos técnico operatórios, o fio FLUXOFIL 19 HD demonstrou trabalhar melhor em todas as posições, conseguindo cordões de soldadura visualmente mais satisfatórios comparado com o fio FABSHIELD XLR-8 que apresentou sempre um desalinhamento na simetria do cordão e com mais salpicos. Ambos os fios apresentaram cordões com boas convexidades e boa molhabilidade.

O fio FABSHIELD XLR-8 apresentou algumas vantagens comparado com o fio FLUXOFIL 19 HD tais como maiores taxas de depósito, possibilidade de trabalhar com *stick-out* maiores e não necessidade de gás de protecção, o que se traduz numa redução dos custos.

O fio FLUXOFIL 19 HD tem um muito fácil destacamento da escória comparado com o autoprotégido, resultando numa diminuição de tempo na preparação entre passes.

Tabela 4.1 - Parâmetros médios para cada passe.

<b>Soldadura com fio FLUXOFIL 19 HD</b>				
<b>Passe Nº</b>	<b>Intensidade de corrente (A)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Velocidade de soldadura (cm/s)</b>	<b>Entrega térmica (J/cm)</b>
1	147,5	21,9	0,12	21535,0
2	199,5	24,7	0,24	16425,5
3	196,0	24,7	0,35	11066,0
4	202,0	25,0	0,34	11882,3
5	213,5	25,0	0,40	10675,0
6	200,0	25,0	0,43	9302,0
7	211,5	25,0	0,46	9195,0
8	171,0	22,1	0,21	14396,5
9	205,5	24,9	0,25	16374,2
10	208,5	25,0	0,48	8687,5
11	205,5	25,0	0,45	9133,3
12	204,0	25,0	0,43	9488,4
13	206,0	25,0	0,45	9155,5
14	209,5	25,0	0,42	9976,2
15	208,0	25,0	0,44	9454,5
16	217,0	26,7	0,33	14045,8
17	204,0	26,7	0,41	10627,9
18	212,0	26,7	0,45	10062,9
19	197,0	25,2	0,48	8274,0
20	203,0	25,2	0,50	8184,9
21	210,5	25,7	0,42	10304,4
22	211,0	25,2	0,35	12153,6
23	202,0	25,2	0,40	10180,8
24	199,5	25,2	0,37	10870,0

Tabela 4.2 - Parâmetros médios para os cordões de raiz, de enchimento e de face.

<b>Soldadura com fio FLUXOFIL 19 HD</b>					
<b>Cordão</b>	<b>Nº passes</b>	<b>Intensidade de corrente (A)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Velocidade de soldadura (cm/s)</b>	<b>Entrega térmica (J/cm)</b>
<b>Raiz</b>	14 e 15	208,8	25,0	0,43	9711,6
<b>Enchimento</b>	4-13 e 16-20	203,5	25,1	0,40	10215,7
<b>Vista</b>	21-24	205,7	25,3	0,38	10956,2

Tabela 4.3 - Parâmetros médios para cada passe.

<b>Soldadura com o fio FABSHIELD XLR-8</b>				
<b>Passe Nº</b>	<b>Intensidade de corrente (A)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Velocidade de soldadura (cm/s)</b>	<b>Entrega térmica (J/cm)</b>
<b>1</b>	124,0	17,9	0,09	19729,8
<b>2</b>	191,5	20,9	0,17	18834,5
<b>3</b>	197,5	21,4	0,24	14088,3
<b>4</b>	199,0	21,4	0,19	17930,9
<b>5</b>	198,0	21,4	0,19	17840,8
<b>6</b>	195,5	21,4	0,27	12396,1
<b>7</b>	246,0	22,4	0,21	20992,0
<b>8</b>	244,5	22,4	0,20	21907,2
<b>9</b>	194,5	22,6	0,16	21978,5
<b>10</b>	183,0	21,4	0,15	20886,4
<b>11</b>	185,0	20,5	0,20	15170,0
<b>12</b>	187,5	22,0	0,20	16500,0
<b>13</b>	174,5	20,5	0,20	14309,0
<b>14</b>	174,0	21,0	0,19	15385,2

Tabela 4.4 - Parâmetros médios para cordões de raiz, de enchimento e de face.

<b>Soldadura com o fio FABSHIELD XLR-8</b>					
<b>Cordão</b>	<b>Nº passes</b>	<b>Intensidade de corrente (A)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Velocidade de soldadura (cm/s)</b>	<b>Entrega térmica (J/cm)</b>
<b>Raiz</b>	10-11	184,0	20,95	0,18	17132,4
<b>Enchimento</b>	2-9	208,3	21,7	0,21	17219,5
<b>Vista</b>	12-14	178,7	21,2	0,29	10450,8

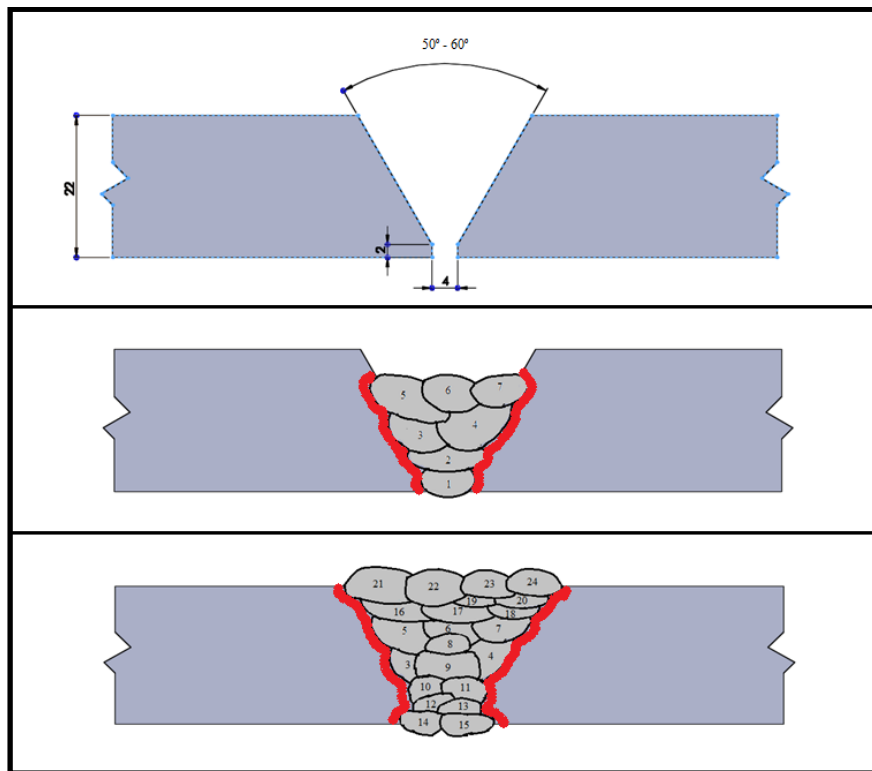


Figura 4.1 - Sequência de cordões na soldadura realizada com o fio FLUXOFIL 19 HD  
A) Junta a soldar, B) Passes pré reprise e C) Passes pós reprise.

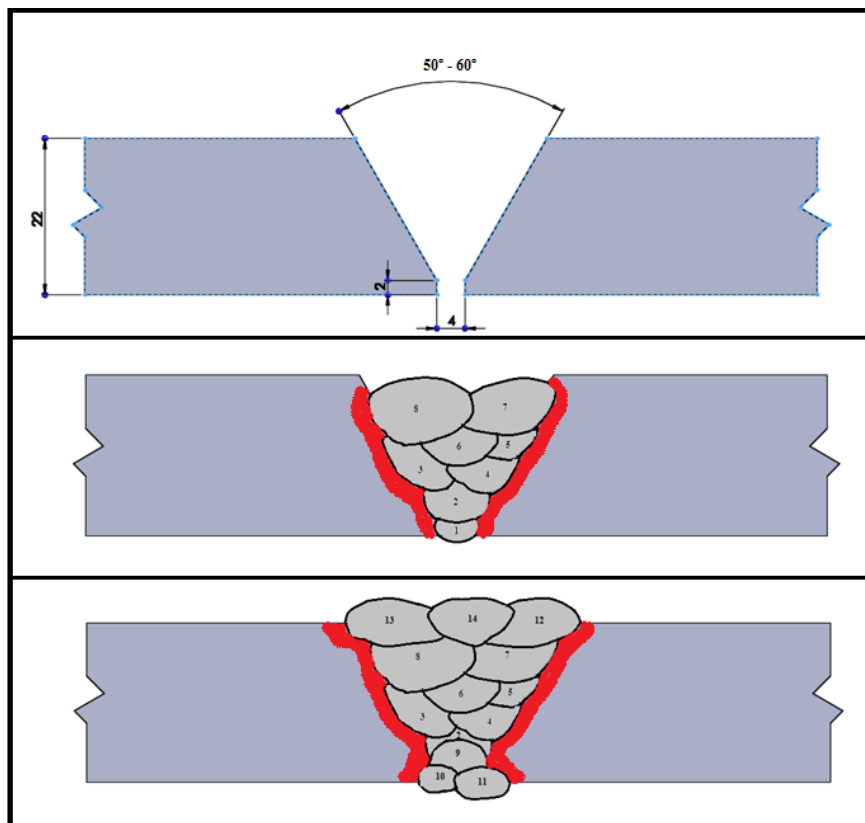


Figura 4.2 - Sequência de cordões na soldadura realizada com fio da FABSHIELD XLR-8  
A) Junta a soldar, B) Passes pré reprise e C) Passes pós reprise.

## 4.2. Ensaios não destrutivos

### 4.2.1. Líquidos penetrantes

Não se observaram quaisquer defeitos superficiais ao longo do cordão. Pela norma EN 23277 o resultado do ensaio por líquidos penetrantes foi aceite.

### 4.2.2. Radiografia

Nas Figuras 4.3 e 4.4 apresentam-se as radiografias realizadas aos dois cordões de soldadura realizadas com os dois consumíveis.

Não foi detectado qualquer defeito interno na soldadura nos dois processos, no entanto, é possível observar na Figura 4.3 a existência ao longo do cordão de uma linha resultado da convexidade excessiva na concordância entre os dois cordões de raiz.

O resultado da inspecção por radiografia é aceite pela norma EN ISO 10675-1.

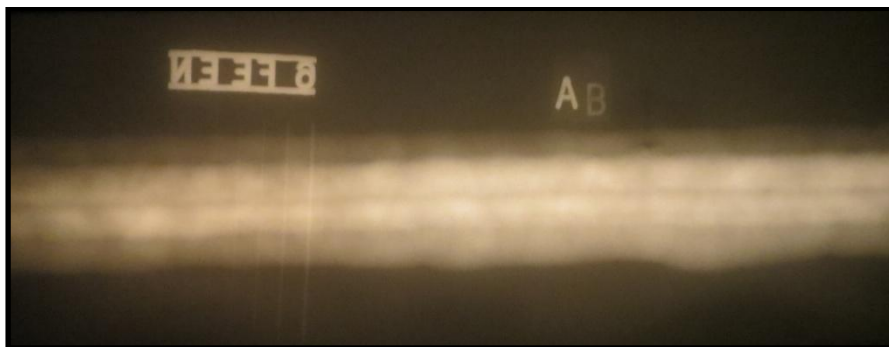


Figura 4.3 - Radiografia - Soldadura realizada com fio FLUXOFIL 19 HD.

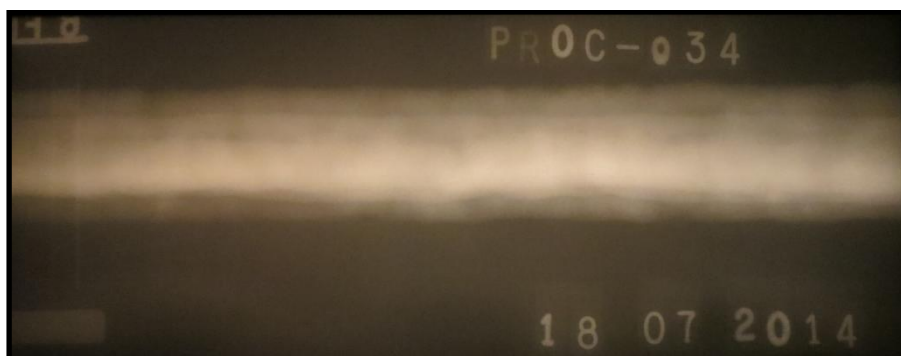


Figura 4.4 - Radiografia - Soldadura realizada com fio FABSHIELD XLR-8.



### 4.3. Ensaios Destrutivos

#### Plano de ensaios de materiais

A Tabela 4.5 apresenta, de forma resumida, os ensaios que foram realizados na qualificação do processo segundo a norma NP EN ISO 15614 e as normas referentes às dimensões dos provetes para cada ensaio assim como as normas que definem o critério de aceitação.

Tabela 4.5 - Plano de ensaios de materiais.

Nº ens. Req.	Tipo de teste	Local. do provete	Dimens. do provete	Temp. de ensaio	Execução	Critério de aceitação	Nº dos provetes Oerlikon	Nº dos provetes Hobart
2	Tracção transversal	2 e 14	ASME IX:2013 Fig. QW-462.1 (a)	23±5	ASME IX:2013 QW-152	EN 10025-2:2004	1 e 2	18 e 19
4	Dobragem lateral	1,3,13 e 15	ASME IX:2013 Fig. QW-462.2	23±5	ASME IX:2013 QW-162	ASME IX:2013 QW-163	3 a 6	20 a 23
3	Choque MD	4,5 e 6	ASME IX:2013 SA370	-40	ASME IX:2013 QW-170	Aceitar pelo cliente	7 a 9	24 a 26
3	Choque Linha fusão	7,8 e 9	ASME IX:2013 SA370	-40	ASME IX:2013 QW-170	Aceitar pelo cliente	10 a 12	27 a 29
3	Choque linha fusão + 2 mm	10,11 e 12	ASME IX:2013 SA370	-40	ASME IX:2013 QW-170	Aceitar pelo cliente	13 a 15	30 a 32
1	Macrografia	16	120x22x10 mm	23±5	EN ISO 17639:2013	EN ISO 5817:2014 Nível C e B	16	33
1	Dureza	16	120x22x10 mm	23±5	EN ISO 6507-1:2005 EN ISO 9015-1:2011 HV-10	EN ISO 15614-1:2004/A2:2012 ≤ 380 HV10	17	34

#### 4.3.1. Macrografias

As Figuras 4.5 e 4.6 ilustram as macrografias realizadas numa secção transversal nas duas soldaduras onde é possível observar nitidamente as três zonas (ZF, ZTA e MB). Verifica-se que em ambas as soldaduras existe uma sobreespessura tanto nos cordões de face como nos cordões de raiz com uma convexidade excessiva nas concordâncias entre cordões e entre estes e o MB. Na soldadura com o fio FLUXOFIL 19 HD a concordância entre os dois cordões de raiz é deficiente. Estes defeitos em aplicações sujeitas a esforços de fadiga proporcionam condições favoráveis para que haja localmente uma concentração de tensões conduzindo ao início e consequentemente à propagação de uma fissura na estrutura. Deve-se por exemplo, afagar-se a soldadura antes de submeter o conjunto a esforços.

Segundo a norma NP EN ISO 15614-1, para este tipo de imperfeições deve ser aplicado o nível de qualidade C para qualificação do processo.

Observa-se uma banda de segregações a meia espessura que é tipicamente constituída por impurezas como fósforo e enxofre, resultado do processo de laminagem da própria chapa. Este tipo de defeito é comum em chapa espessa laminada podendo ocorrer arrancamento lamelar se a chapa fosse sujeita a esforços de tracção no sentido da espessura, no entanto, para a aplicação a que se destina a chapa não será sujeita a esse tipo de esforços.

É possível observar ainda uma ZTA maior na soldadura realizada com o fio auto protegido em consequência das maiores entregas térmicas envolvidas no processo, embora esta ZTA esteja menos contrastada o que indica que as estruturas nesta zona devem ser menos duras que na ZTA do fio FLUXOFIL 19 HD.



Figura 4.5 - Macrografia à soldadura realizada com fio FLUXOFIL 19 HD

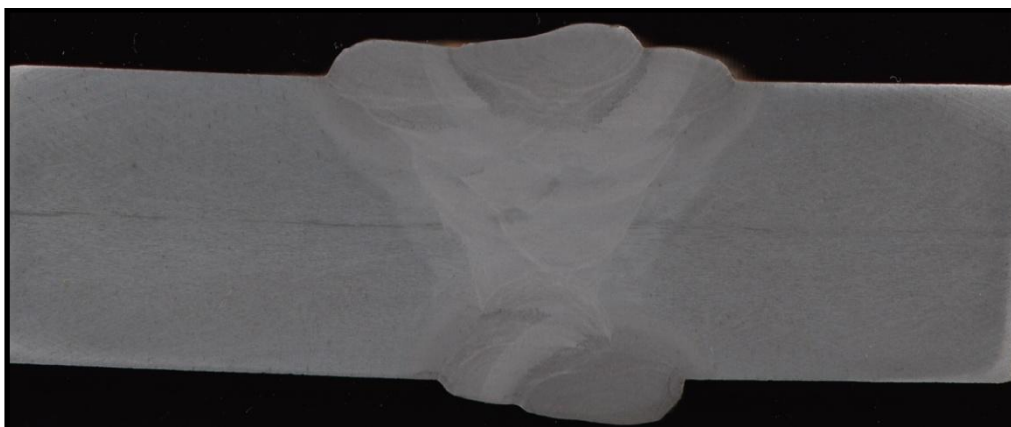


Figura 4.6 - Macrografia à soldadura realizada com fio FABSHIELD XLR-8

### **4.3.2. Micrografias**

Nas tabelas seguintes apresentam-se as micrografias do MB, do cordão de face e da zona entre passes, do cordão de raiz e ZTA para as soldaduras realizadas com os dois MA. Podem identificar-se heterogeneidades, microestruturas (estrutura de grão, morfologia, precipitados e inclusões).

#### **Material Base**

A Tabela 4.6 apresenta micrografias do MB com diferentes ampliações.

Pode-se constatar que o MB apresenta uma estrutura ferrítico perlítica de grão fino típica de um aço carbono hipoeutectóide com orientação preferencial do grão devido à laminagem a frio.

#### **Zona fundida**

A ZF apresenta uma estrutura colunar constituída por ferrite proeutectóide nos limites de grão da austenite e perlite.

A ZF obtida com o fio FLUXOFIL 19 HD é, contudo, mais fina dado que a entrega térmica do processo é menor e consequentemente a estrutura apresenta uma ferrite acicular (A), ferrite poligonal (B) e perlite fina com bainite superior dados os valores de dureza registados nesta região (superiores a 220 HV). [26]

São visíveis muitas inclusões de muito pequena dimensão dispersas na estrutura.

A ZF observada com o fio consumível FABSHIELD XLR-8 é mais grosseira com uma ferrite primária mais poligonizada não sendo evidente ferrite acicular ou de widmanstatten.

### **Zona termicamente afectada**

A ZTA da soldadura com o fio FLUXOFIL 19 HD revela uma estrutura fina de bainite com durezas que abrangem os 320 HV junto à linha de fusão.

A ZTA da soldadura com o fio FABSHIELD XLR-8, tem uma estrutura grosseira de ferrite, perlite e bainite fina com durezas inferiores a 270 HV devido à baixa velocidade de arrefecimento associado à entrega térmica média possível com este consumível.

Tabela 4.6 - Micrografia ao aço carbono-manganês S355J2+N.

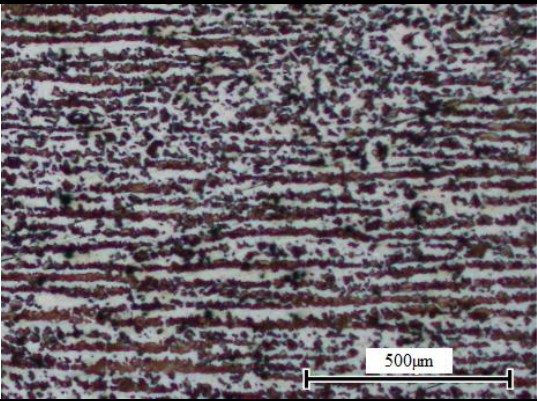
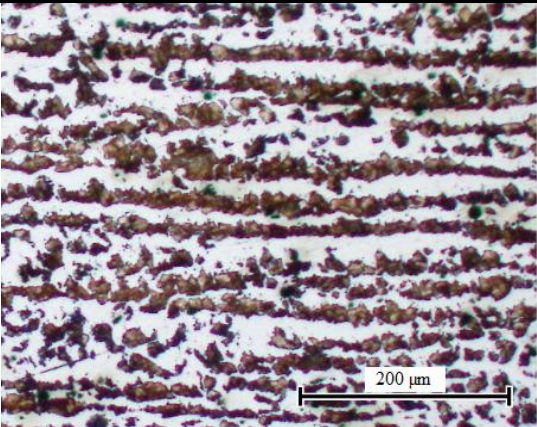
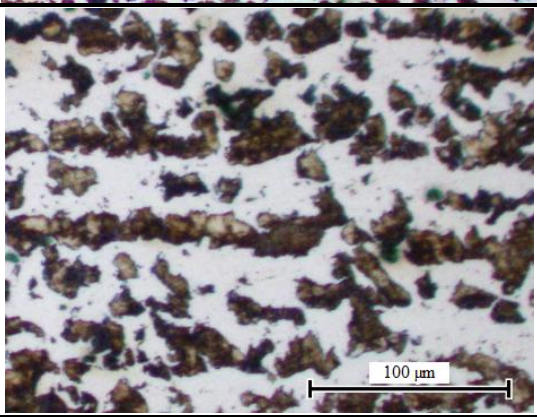
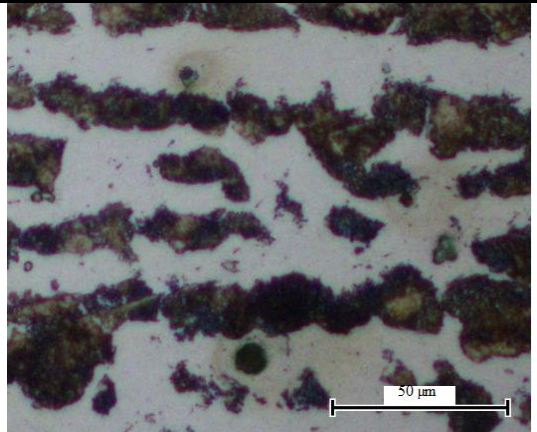
50x	
100x	
200x	
500x	



Tabela 4.7 - Micrografias à soldadura realizada com o fio FLUXOFIL 19 HD.

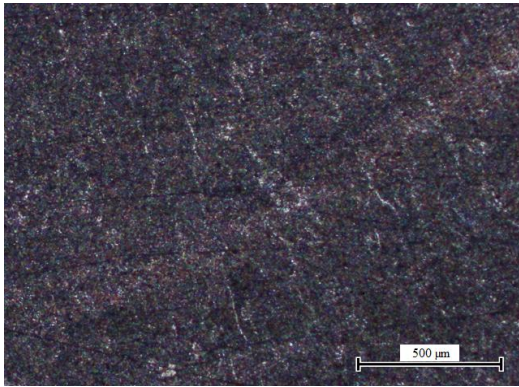
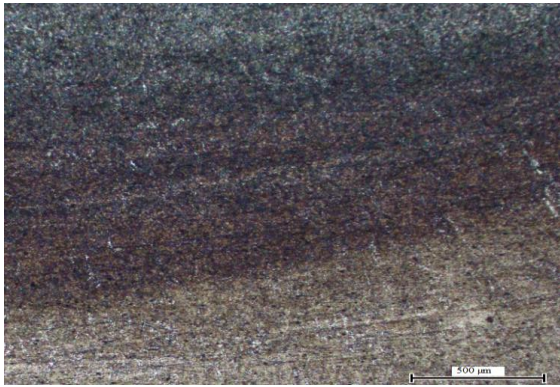
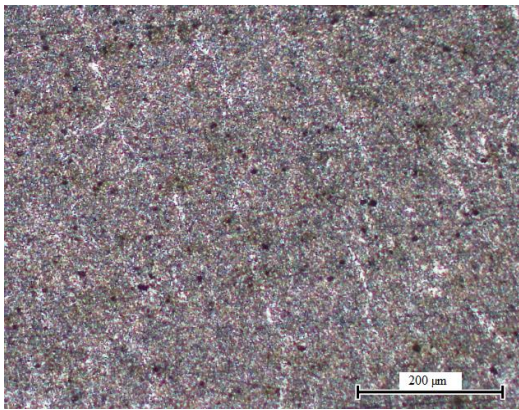
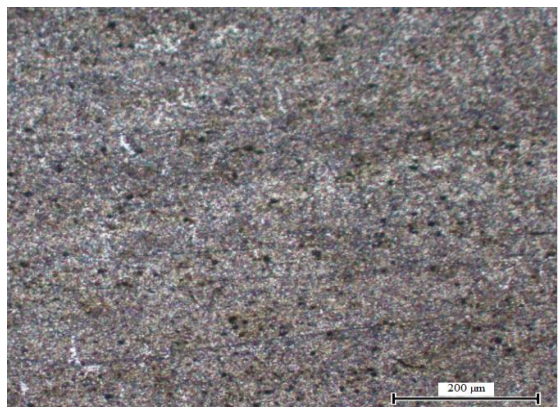
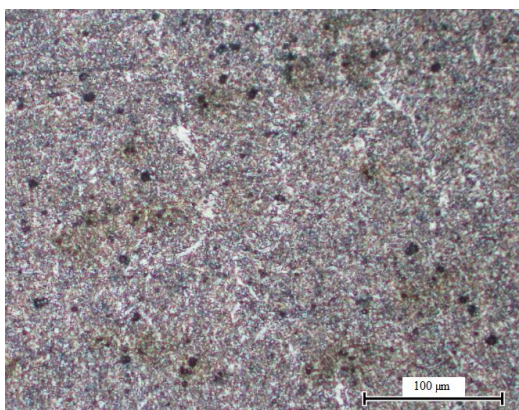
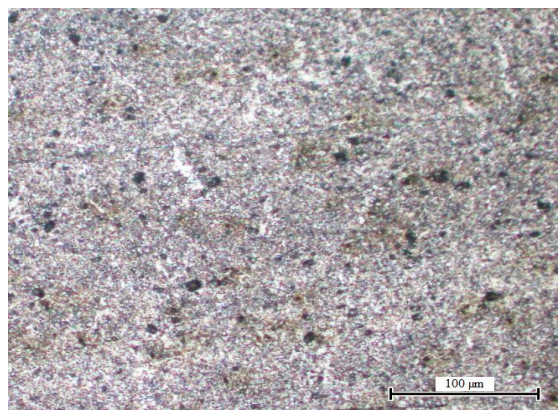
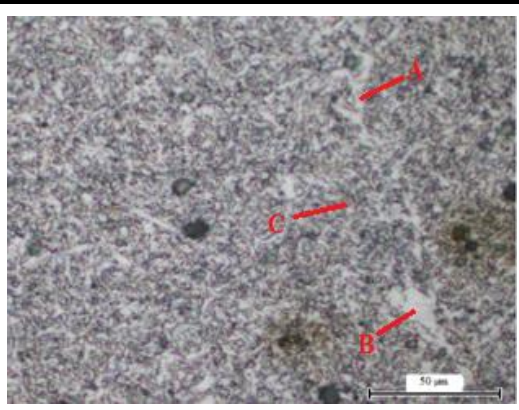
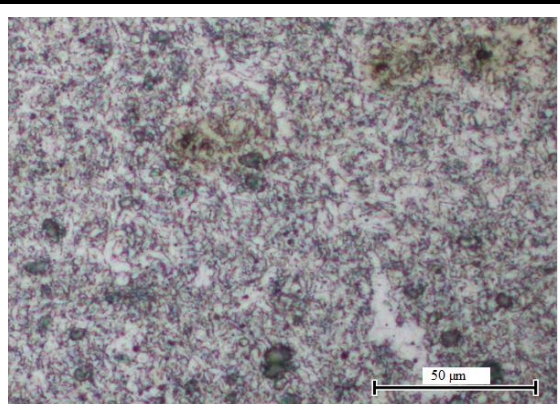
	Cordão de vista	Entre passes
50x		
100x		
200x		
500x		



Tabela 4.8 - Micrografias à soldadura realizada com o fio FLUXOFIL 19 HD.

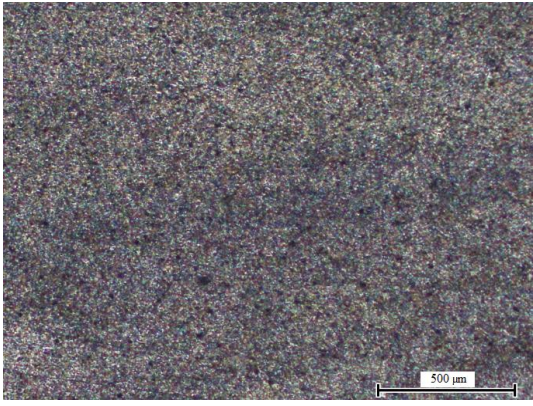

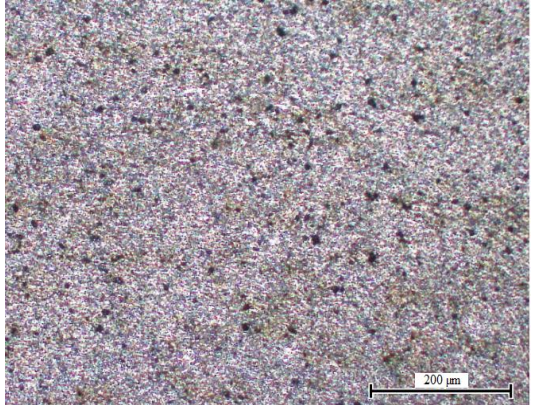

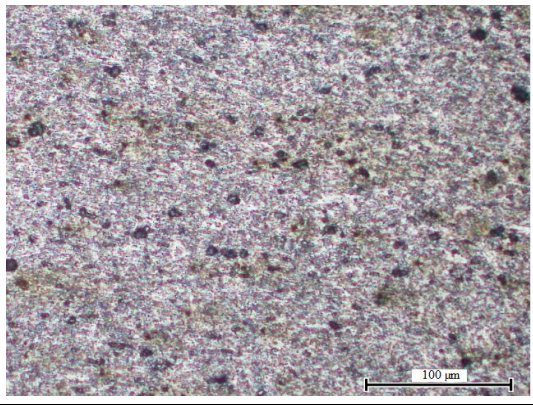
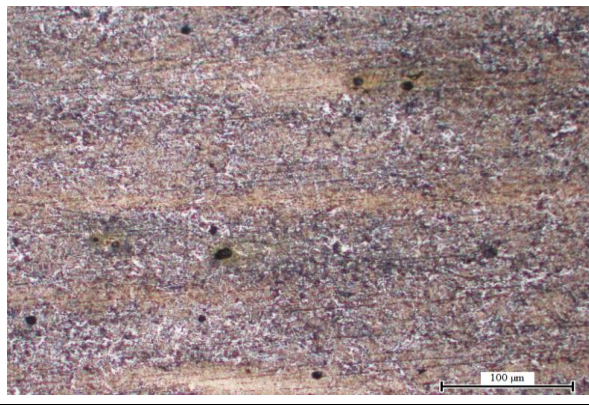
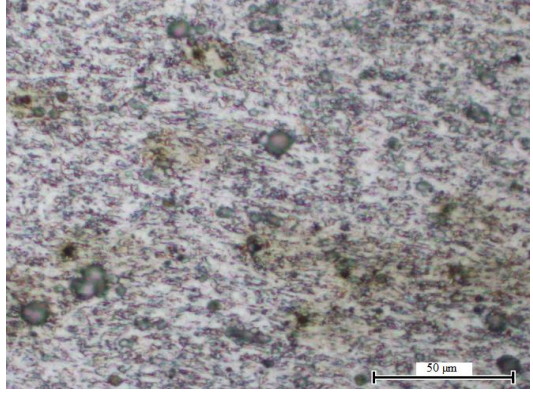
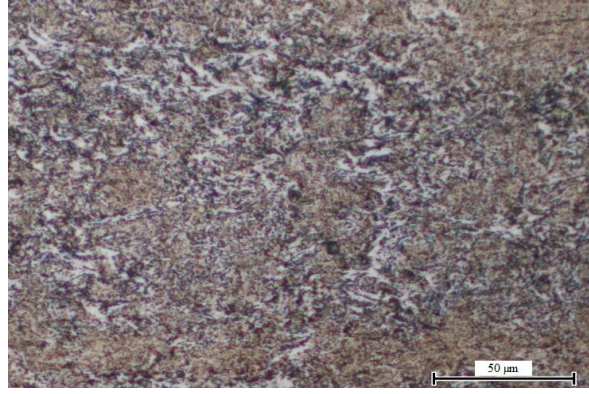
	Cordão de raiz	Zona termicamente afectada
50x		
100x		
200x		
500x		



Tabela 4.9 - Micrografias à soldadura realizada com o fio FABSHIELD XLR-8.

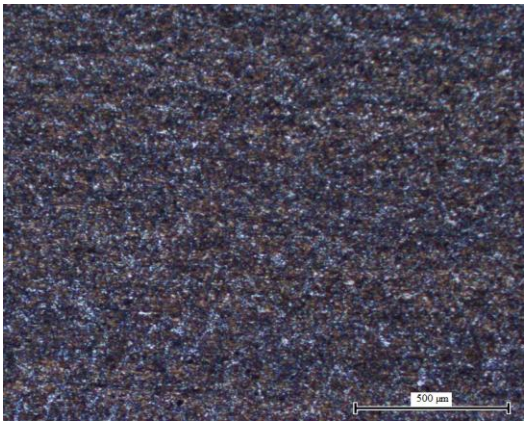

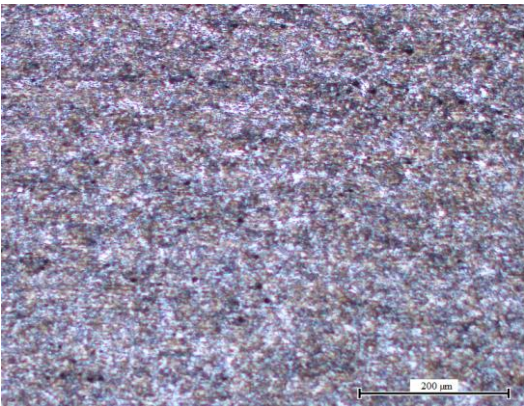
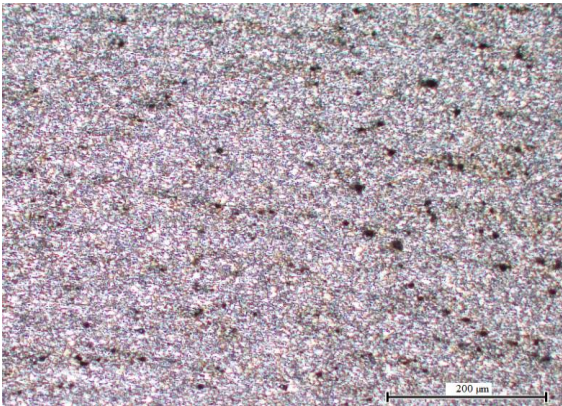
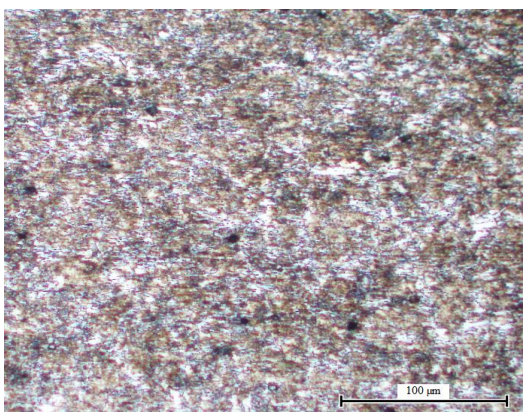
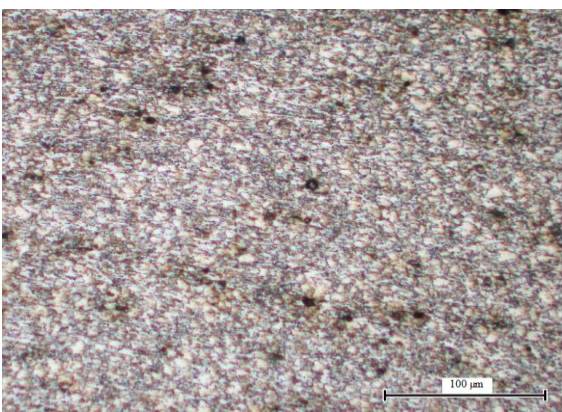
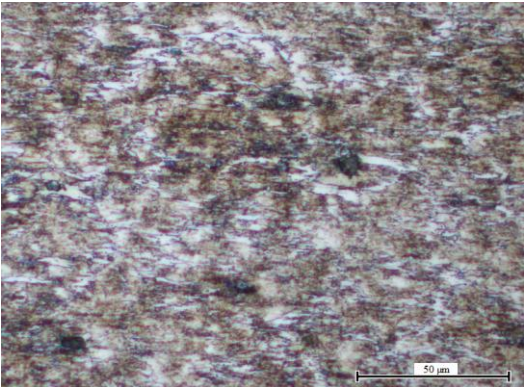
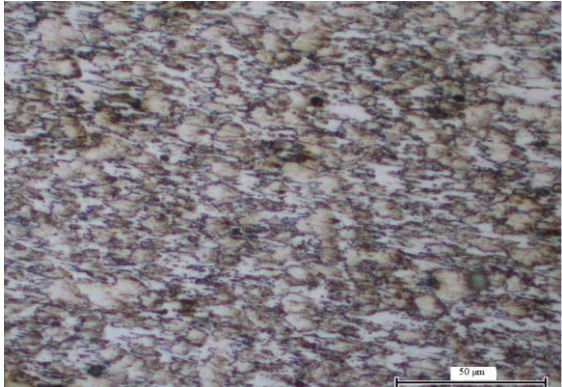
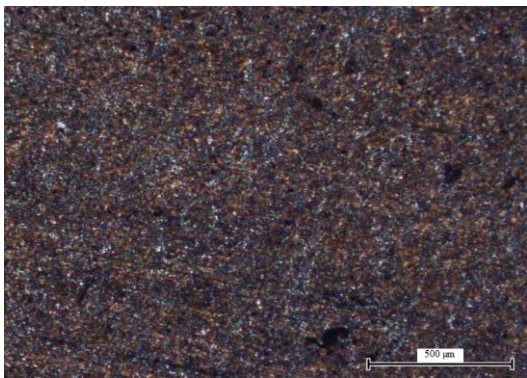

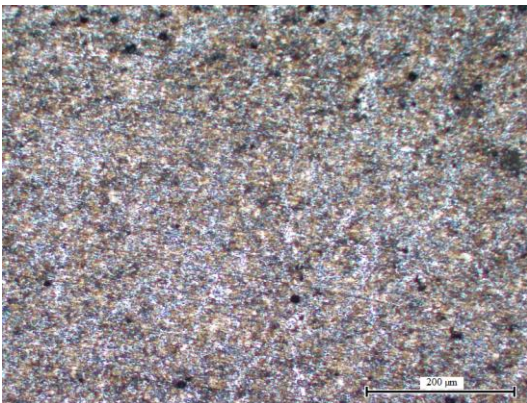
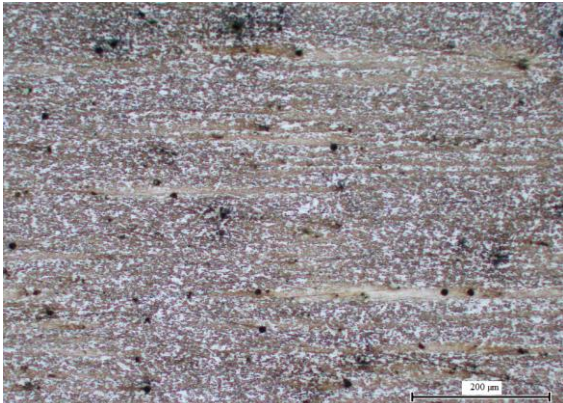
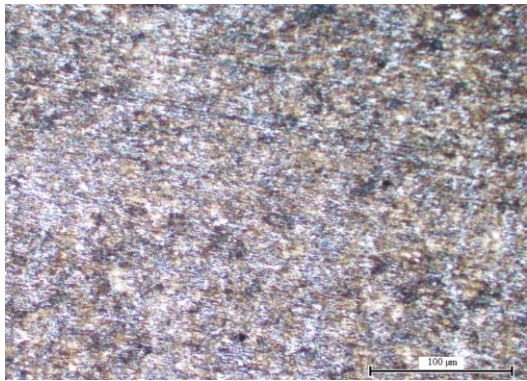
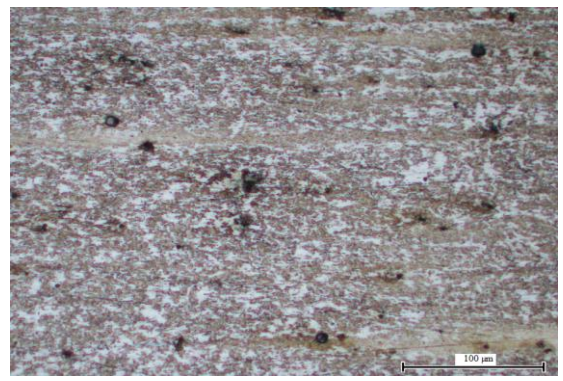
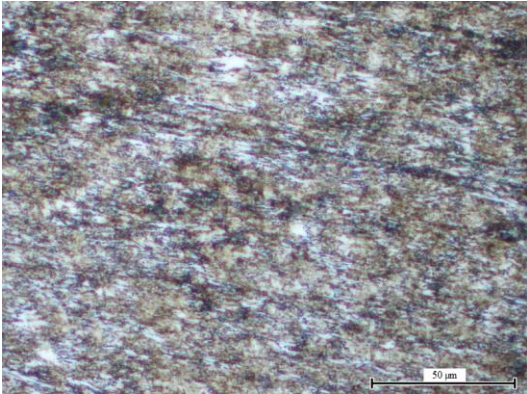
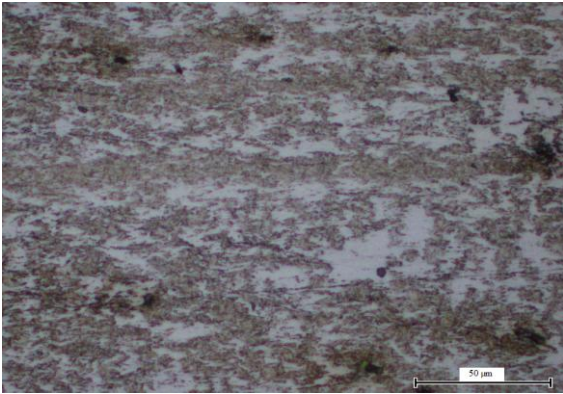
	Cordão de vista	Entre passes
50x	 Micrograph showing the weld bead at 50x magnification. The image displays a dark, granular texture with a scale bar indicating 500 µm.	 Micrograph showing the weld interpass at 50x magnification. The image displays a dark, granular texture with a scale bar indicating 500 µm.
100x	 Micrograph showing the weld bead at 100x magnification. The image displays a granular texture with a scale bar indicating 200 µm.	 Micrograph showing the weld interpass at 100x magnification. The image displays a granular texture with a scale bar indicating 200 µm.
200x	 Micrograph showing the weld bead at 200x magnification. The image displays a granular texture with a scale bar indicating 100 µm.	 Micrograph showing the weld interpass at 200x magnification. The image displays a granular texture with a scale bar indicating 100 µm.
500x	 Micrograph showing the weld bead at 500x magnification. The image displays a granular texture with a scale bar indicating 50 µm.	 Micrograph showing the weld interpass at 500x magnification. The image displays a granular texture with a scale bar indicating 50 µm.



Tabela 4.10 - Micrografias à soldadura realizada com o fio FABSHIELD XLR-8.

	Cordão de raiz	Zona termicamente afectada
50x		
100x		
200x		
500x		

### 4.3.3. Ensaios de tracção

As Tabelas 4.11 e 4.12 apresentam os valores obtidos nos ensaios de tracção, sendo possível observar que os valores obtidos no ensaio para os dois consumíveis encontram-se dentro da gama de valores especificado pela certificação do material e segundo a norma EN 10025-2:2004, o ensaio é aceite. Os valores de tensão de rotura são semelhantes para os dois consumíveis.

Tabela 4.11 - Resultados dos ensaios de tracção.

<b>Ensaio de tracção - FLUXOFIL 19 HD</b>							
PROVETE N°	LOCAL DO PROVETE	DIMENSÕES DO PROVETE		SECÇÃO INICIAL (So) mm <sup>2</sup>	FORÇA MÁXIMA (Fm) KN	TENSÃO RUPTURA (Rm) MPa	VELOCID. DE TENSÃO (Ḑ) MPa/s
		Espessura (a) mm	Largura (b) mm				
1	2	21,40	19,03	407,25	251,90	619	15
2	14	21,35	19,01	405,73	253,98	626	15

\* Valores requeridos:  $470 \leq R_m \leq 630$

Tabela 4.12 - Resultados dos ensaios de tracção.

<b>Ensaio de tracção - FABSHIELD XLR-8</b>							
PROVETE N°	LOCAL DO PROVETE	DIMENSÕES DO PROVETE		SECÇÃO INICIAL (So) mm <sup>2</sup>	FORÇA MÁXIMA (Fm) KN	TENSÃO RUPTURA (Rm) MPa	VELOCID. DE TENSÃO (Ḑ) MPa/s
		Espessura (a) mm	Largura (b) mm				
18	2	20,89	19,04	397,61	247,75	623	15
19	14	20,91	19,00	397,23	249,12	627	15

\* Valores requeridos:  $470 \leq R_m \leq 630$

Os provetes fracturaram no material base como mostra a Figura 4.7 demonstrando que o cordão de soldadura apresenta maior resistência à tracção que o material base.

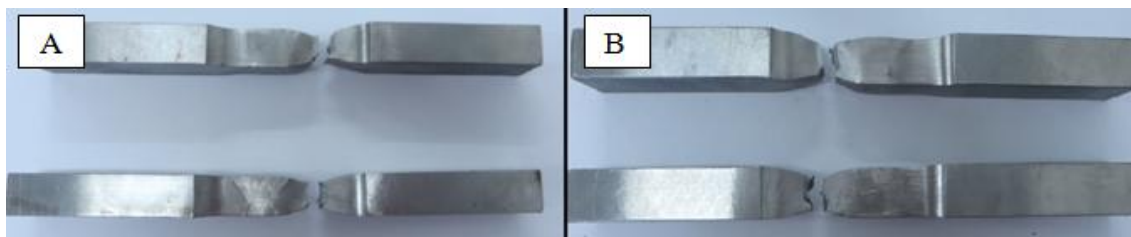


Figura 4.7 - Ensaio de tracção - Local de fractura nos provetes soldados pelo fio  
A) FLUXOFIL 19 HD e B) FABSHIELD XLR-8.

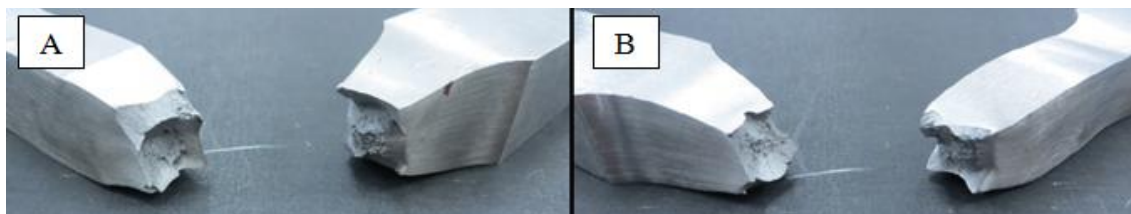


Figura 4.8 - Ensaio de tracção - Superfície da fractura nos provetes soldados pelo fio  
A) FLUXOFIL 19 HD e B) FABSHIELD XLR-8.



#### 4.3.4. Ensaio de dobragem

Os provetes não apresentaram qualquer defeito na superfície de dobragem e pela norma ASME IX:2013 QW-163, o ensaio é aceite para ambos os consumíveis, provando-se desta forma que as soldaduras apresentam boas ductilidades para a aplicação a que se destinam.

Tabela 4.13 - Resultados dos ensaios de dobragem.

<b>Ensaio de dobragem - FLUXOFIL 19 HD e FABSHIELD XLR-8</b>							
PROVETE N°	LOCAL DO PROVETE	DIMENÇÕES DO PROVETE mm	TIPO DE PROVETE	DIÂMETRO DO MANDRIL mm	ÂNGULO DE DOBRAGEM ( $\alpha$ ) °	DISTÂNCIA ENTRE ROLOS (I) mm	OBS.
3	1	22 x 10	SBB	40	180°	60	---
4	3	22 x 10	SBB	40	180°	60	---
5	13	22 x 10	SBB	40	180°	60	---
6	15	22 x 10	SBB	40	180°	60	---

A Figura 4.9 ilustra os ângulos de dobragem dos provetes após ensaio.

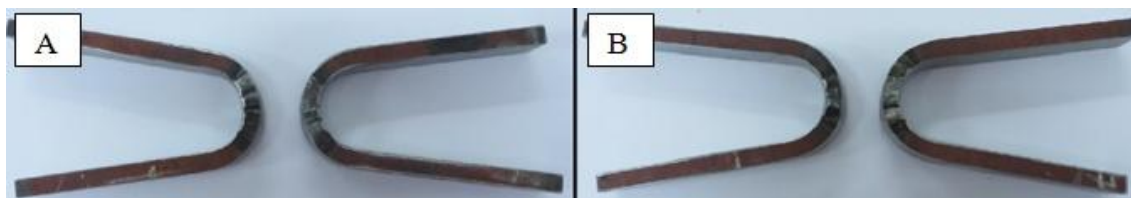


Figura 4.9 - Ensaio de dobragem - Provetes soldados com fio  
A) FLUXOFIL 19 HD e B) FABSHIELD XLR-8.

A Figura 4.10 ilustra a superfície que foi dobrada provando a inexistência de qualquer defeito nesse local.

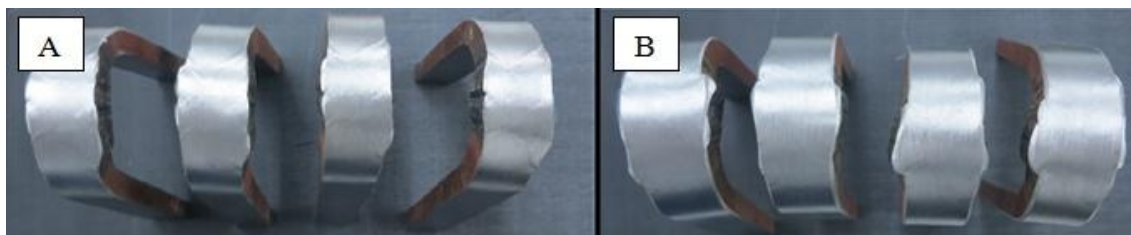


Figura 4.10 - Ensaio de dobragem - Superfície de dobragem dos provetes soldados com A) FLUXOFIL 19 HD e B) FABSHIELD XLR-8

#### 4.3.5. Ensaios de impacto

O material base usado neste estudo foi o S355J2+N que foi inicialmente classificado para requisitos de impacto a -20 °C. Posteriormente a DNV certificou-o para requisitos de impacto a -40 °C passando a ser um aço considerado equivalente ao EH36. Por esta razão leva a que a decisão do ensaio esteja dependente da aceitação por parte do cliente.

Apesar das duas soldaduras apresentarem valores de tenacidade aceitáveis para a aplicação em estudo, a soldadura com fio FLUXOFIL 19 HD apresentou valores de tenacidade superiores à soldadura com fio FABSHIELD XLR-8. A principal razão pela qual o fio FLUXOFIL 19 HD se destaca é devido à sua composição química com elementos afinadores de grão como o vanádio, que possibilita obter uma estrutura de grão mais fina e desta forma obter um maior número de limites de grãos ao longo de todo o cordão. Os limites de grão servem de barreiras que permitem acomodar melhor as forças de compressão dando maior tenacidade ao material. Pela norma ISO 9016, o ensaio foi aceite.

Tabela 4.14 - Resultados dos ensaios de impacto.

Ensaio de impacto - FLUXOFIL 19 HD									
PROVETE Nº	LOCAL DO PROVETE	LOCAL DO ENTALHE	TEMP. DO ENSAIO  °C	DIMENSÕES DO PROVETE				ENERGIA ABSORVIDA KV <sub>2</sub>	
				Espessura (h)	Largura (w)	Comprimento (l)	Prof. do entalhe	Val.Ind.	Média
				mm	mm	mm	mm	J	J
Valores req.		---	-40	10 ± 0,11	10 ± 0,075	55 ± 0,60	2 ± 0,075	≥ 18	≥ 24
7	4	V.W.T.	-40	10,01	10,00	55,07	2,02	86	88 ± 3,46
8	5	V.W.T.	-40	10,01	10,00	55,07	2,01	86	
9	6	V.W.T.	-40	10,00	10,00	55,09	2,01	92	
10	7	V.H.T.	-40	10,00	10,01	55,04	2,01	52	80 ± 25
11	8	V.H.T.	-40	10,01	10,00	55,04	2,00	86	
12	9	V.H.T.	-40	10,01	10,01	55,06	2,00	101	
13	10	V.H.T. +2	-40	10,02	10,02	55,06	2,00	25	28 ± 12,97
14	11	V.H.T. +2	-40	10,01	10,01	55,07	2,01	22	
15	12	V.H.T. +2	-40	10,01	10,01	55,07	2,01	38	

Tabela 4.15 - Resultados dos ensaios de impacto.

Ensaio de impacto - FABSHIELD XLR-8									
PROVETE Nº	LOCAL DO PROVETE	LOCAL DO ENTALHE	TEMP. DO ENSAIO  °C	DIMENSÕES DO PROVETE				ENERGIA ABSORVIDA KV <sub>2</sub>	
				Espessura (h)	Largura (w)	Comprimento (l)	Prof. do entalhe	Val.Ind.	Média
				mm	mm	mm	mm	J	J
Valores req.		---	-40	10 ± 0,11	10 ± 0,075	55 ± 0,60	2 ± 0,075	≥ 18	≥ 24
24	4	V.W.T.	-40	10,00	10,00	55,04	2,01	34	32 ± 3,24
25	5	V.W.T.	-40	10,00	10,01	55,03	2,01	28	
26	6	V.W.T.	-40	10,00	10,01	55,05	2,01	33	
27	7	V.H.T.	-40	9,99	10,01	55,05	2,01	80	68 ± 10,97
28	8	V.H.T.	-40	9,99	10,01	55,06	2,01	64	
29	9	V.H.T.	-40	10,00	10,00	55,04	2,01	59	
30	10	V.H.T. +2	-40	10,01	10,00	55,04	2,02	58	55 ± 8,33
31	11	V.H.T. +2	-40	10,00	10,00	55,05	2,01	62	
32	12	V.H.T. +2	-40	10,00	10,00	55,03	2,01	46	

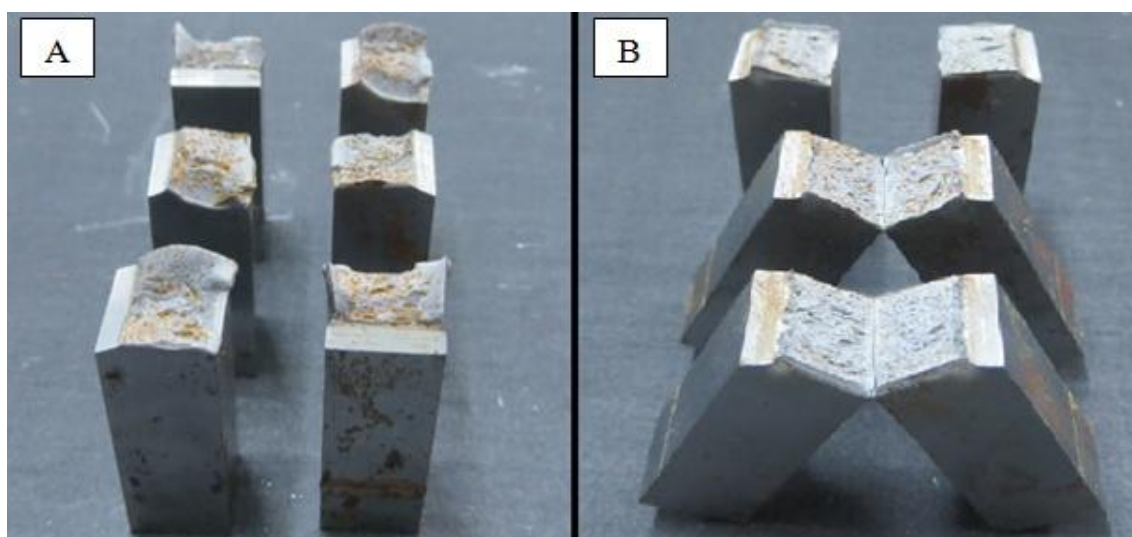


Figura 4.11 - Ensaio de impacto - Superfície da fractura nos provetes soldados pelo fio  
A) FLUXOFIL 19 HD e B) FABSHIELD XLR-8



#### 4.3.6. Ensaios de dureza

As Tabelas 4.17 e 4.20 apresentam os valores de durezas obtidos ao longo das secções A-A', B-B' e C-C' ilustradas nas Figuras 4.11 e 4.13 e representados graficamente nas Figuras 4.12 e 4.14.

Constata-se nas duas soldaduras, uma tendência semelhante na variação dos valores de dureza ao longo da secção do cordão de soldadura típica de uma soldadura multipasse. Observam-se os valores maiores de dureza na ZTA devido à baixa velocidade de arrefecimento.

Tabela 4.16 - Resultados dos ensaios de dureza.

<b>Ensaio de dureza - FLUXOFIL 19 HD</b>						
PROVETE Nº	TIPO DE DUREZA	CARGA UTILIZADA Kg	TEMPO DE CARGA mm	ESPAÇO ENTRE IDENTIFICAÇÕES mm	TEMPERATURA °C	CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO HV
<b>Valores req.</b>		<b>10</b>	<b>15</b>	<b>≥ 1</b>	<b>23 ± 5</b>	<b>≤ 380</b>
17	HV	10	15	≥ 1	21	

Tabela 4.17 - Resultados dos ensaios de dureza.

<b>Ensaio de dureza - FLUXOFIL 19 HD</b>															
LOCAL	MB	MP	MB	ZTA	ZTA	ZTA	MD	MD	MD	ZTA	ZTA	ZTA	MB	MB	MB
<b>A-A'</b>	160	160	165	228	309	322	228	221	221	309	236	206	170	165	165
<b>B-B'</b>	165	165	160	187	206	236	236	228	236	254	221	213	160	160	165
<b>C-C'</b>	160	165	160	193	297	309	221	221	221	322	309	236	160	160	165

Tabela 4.18 - Resultados dos ensaios adicionais de dureza.

Ensaio de dureza - adicionais ZTA - FLUXOFIL 19 HD												
LOCAL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	254	297	309	297	245	228	245	245	297	297	309	297

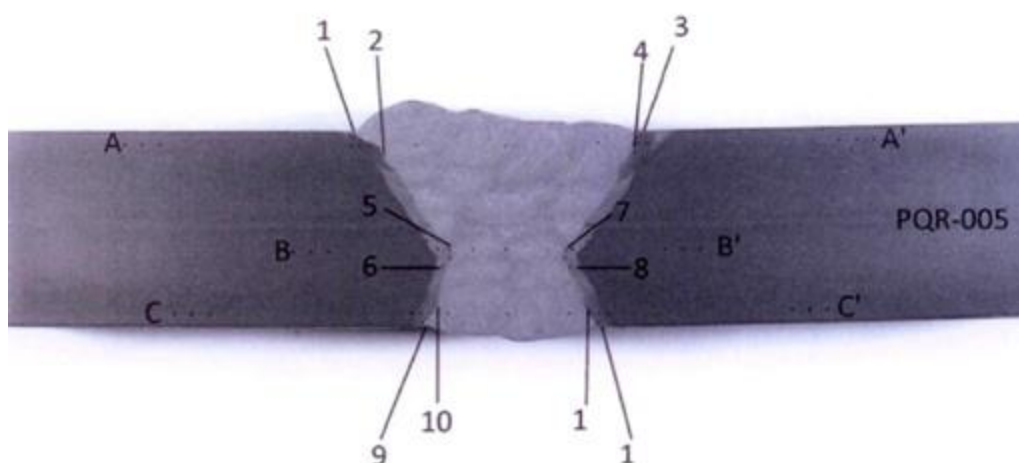


Figura 4.12 - Localização dos ensaios de dureza adicionais na ZTA com o fio FLUXOFIL 19 HD

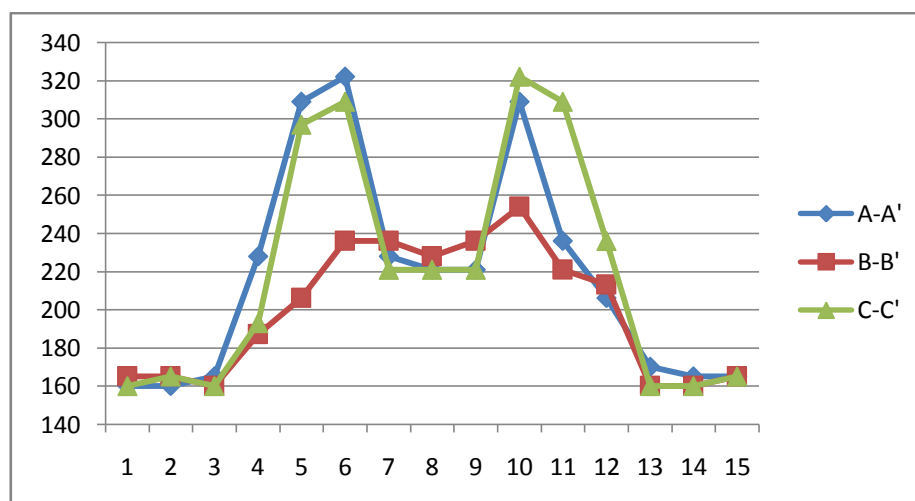


Figura 4.13 - Gráfico da variação da dureza ao longo dos eixos A-A', B-B' e C-C' da soldadura com o fio FLUXOFIL 19 HD

Tabela 4.19 - Resultados dos ensaios de dureza.

Ensaio de dureza - FABSHIELD XLR-8						
PROVETE Nº	TIPO DE DUREZA	CARGA UTILIZADA Kg	TEMPO DE CARGA mm	ESPAÇO ENTRE IDENTIFICAÇÕES mm	TEMPERATURA °C	CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO HV
Valores req.		10	15	≥ 1	23 ± 5	≤ 380
34	HV	10	15	≥ 1	24	

Tabela 4.20 - Resultados dos ensaios de dureza.

Ensaio de dureza - FABSHIELD XLR-8															
LOCAL	MB	MP	MB	ZTA	ZTA	ZTA	MD	MD	MD	ZTA	ZTA	ZTA	MB	MB	MB
A-A'	176	170	176	221	245	274	206	206	213	236	221	206	181	176	181
B-B'	170	176	170	187	206	213	181	187	193	221	221	206	176	181	181
C-C'	181	181	181	213	236	254	206	213	221	264	236	213	181	176	176

Tabela 4.21 - Resultados dos ensaios adicionais de dureza.

Ensaio de dureza - adicionais ZTA - FABSHIELD XLR-8													
LOCAL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
	264	274	254	254	206	221	236	236	254	254	254	264	

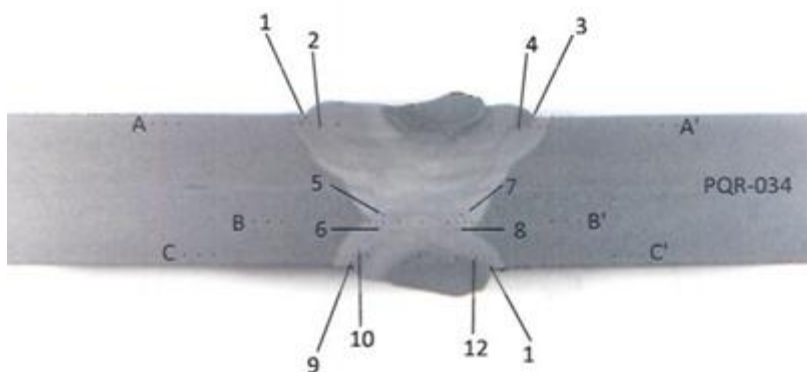


Figura 4.14 - Localização dos ensaios de dureza adicionais na ZTA com o fio FABSHIELD XLR-8

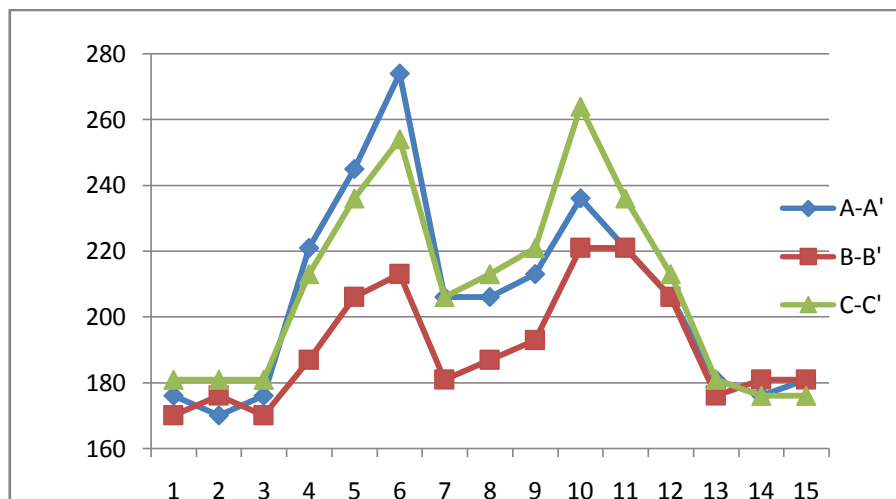


Figura 4.15 - Gráfico da variação da dureza ao longo dos eixos A-A', B-B' e C-C' da soldadura com o fio FABSHIELD XLR-8



## 5. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Do estudo realizado foi possível concluir que:

- O fio auto protegido permite maiores taxas de depósito, reduzindo o número de passes, com maiores entregas térmicas e consequentemente equipamentos com maior valores de intensidade de corrente e tensão disponíveis.
- Este fio contudo tem uma escória mais aderente, mais difícil de remover o que conduz a maiores tempos de preparação entre passes e à facilidade de deixar pequenas inclusões de escória na zona fundida que reduzem as propriedades mecânicas desta zona.
- Os cordões realizados com os dois fios apresentam boa molhabilidade e convexidade.
- O fio fluxado necessita de gás de protecção o que constitui talvez a maior desvantagem do ponto de vista operativo, dado que é necessário ter uma garrafa de gás e um custo adicional associado à protecção gasosa.
- Do ponto de vista mecânico e estrutural, o consumível com protecção gasosa permitiu obter uma tenacidade a baixa temperatura ( $-40^{\circ}\text{C}$ ) superiores o que se deve à estrutura mais fina e à presença de ferrite acicular e do tipo Windmanstätten presentes na zona fundida.
- Apesar deste fio ter um teor em C baixo, a velocidade rápida de soldadura origina elevadas velocidades de arrefecimento e durezas na ZTA superiores. O Mn desempenha aqui também um papel importante no aumento da temperabilidade da zona fundida e da ZTA.
- Todas as restantes propriedades mecânicas estão em conformidade com os códigos e normas de construção.
- Os dois fios estudados apresentam maior produtividade e menor desperdício de material comparado com o processo de soldadura por eléctrodos revestidos.

Resumindo:

O fio fluxado apresenta as seguintes vantagens:

- Maiores tenacidades à fractura a -40 °C.
- Maior facilidade de destacamento da escória.
- Maiores velocidades de soldadura.
- Melhor desempenho na soldadura em todas as posições.

Por sua vez o fio autoprotégido apresenta as seguintes:

- Dispensa protecção gasosa extra.
- Maiores taxas de depósito e de produtividade.
- Possibilidade de trabalhar com comprimentos de stick-out maiores.

Nesta dissertação foram avaliados dois MA de dois fabricantes diferentes. Para a realização de futuros trabalhos, pode ser feita uma avaliação a outros MA de outros fabricantes, uma vez que é uma variável essencial na qualificação de um processo de soldadura, compará-los entre si e com os MA estudados nesta dissertação.

## 6. Bibliografia

- [1] CESA (20 de Novembro de 2013), "Towards a new dawn. Europe's response to the global shipbuilding crisis", disponível em:  
[http://www.cesa.eu/leadership\\_documents](http://www.cesa.eu/leadership_documents)
- [2] FairPlay24, " *Latest Markets News*". (11 de Novembro de 2013), disponível em:  
<http://www.fairplay.co.uk/>
- [3] L. s. Register. (10 de Janeiro de 2014), "*Global Marine Trends 2030*", disponível em:  
<http://www.lr.org/sectors/marine/GTC/gmt2030.aspx>
- [4] J. V. d. Sousa, "A indústria naval no horizonte 2020: Potencial económico e perspectivas", conferência em Biblioteca Municipal de Viana do Castelo, 28 de Junho de 2012
- [5] CESA (22 de Novembro de 2013), "*EC LeaderSHIP 2015 Progress Report*", *Abril de 2007*, disponível em:  
[http://www.cesa.eu/leadership\\_documents](http://www.cesa.eu/leadership_documents)
- [6] J. V. d. Sousa e. F. H. Duarte, "Modernização e inovação na construção e reparação naval", Associação das Indústrias Marítimas, Lisboa, Portugal.
- [7] J. F. O. Santos e. L. Quintino, *Processos de Soldadura*. ISQ, Lisboa, 1998.
- [8] *Welding Handbook*, "Welding Processes", 8ª ed. vol. 2, 1997.
- [9] The Lincoln Electric Company, "*The Procedure Handbook of Arc Welding*", 1973.
- [10] I. A. I. Syarul Asraf Mohamat, Amalina Amir and Abdul Ghalib, "The Effect of Flux Core Arc Welding (FCAW) processes on diferent parameters", 2012.
- [11] Lincoln Electric, The welding experts. (13 de Novembro de 2013) disponível em:  
<http://www.lincolnelectric.com/en-us/Pages/default.aspx?locale=1033>
- [12] C. d. S. e. ValtairAntonioFerraresi, "Análise comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW com transferência metálica por curto circuito na posição horizontal", *Revista soldagem e inspecção*, vol. 18, [Jul/Set] 2013.
- [13] T. Kannan and N. Murugan, "Effect of flux cored arc welding process parameters on duplex stainless steel clad quality", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 176, pp. 230-239, Jun 6 of 2006.
- [14] K. S. Drakopoulos, George Tsoukantas, George Chryssolouris, "Environmental Impact of Ship Hull Repair", presented at the 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, 2006.



- [15] H. R. G. a. A. H. Raouf, "Effect of Gas-Shielded Flux Cored Arc Welding Parameters of Weld Width and Tensile Properties of Weld Metal in a Low Carbon Steel", *Applied Sciences*, 2010.
- [16] E. M. D. Lopes e. R.M.Miranda, "*Metalurgia da soldadura*", Edições Técnicas do Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ), 1993.
- [17] HERA (4 de Setembro de 2014), "*Defects/Imperfection in welds - types of porosity*", disponível em:  
[https://www.hera.org.nz/Category?Action=View&Category\\_id=511](https://www.hera.org.nz/Category?Action=View&Category_id=511)
- [18] ESAB (4 de Setembro de 2014), "*New lean duplex steels and their weldability*" disponível em:  
<http://www.esab.com/global/en/education/new-lean-duplex-steels.cfm>
- [19] N. R. Center (4 de Setembro de 2014), "*Radiograph interpretation - Welds*", disponível em:  
<https://www.ndeed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/TechCalibrations/RadiographInterp.htm>
- [20] M. U. a. P. Z. Jerzy Nowacki "FCAW welding of duplex steel in construction of chemical cargo carriers", *Welding International*, 2009.
- [21] NorthSeaTankers (4 de Setembro de 2014), disponível em:  
<http://www.northseatankers.com/?page=newspage>
- [22] W22, "Offshore Mooring Chain", IACS, 2011.
- [23] J. C. J. Humberto N. Farneze, Luís Souza e Ivaní Bott, "Study of high strength steel weld metals obtained by the SMAW and FCAW processes for offshore applications and mooring chains", *Soldagem e inspecção*, vol. 14, pp. 151-160, 2009.
- [24] S. Kou, "*Welding Metallurgy*", 2ª ed. Wiley Interscience: John Wiley and Sons, 2003.
- [25] NP EN 1011-2+A1, "Soldadura, recomendações para a soldadura de materiais metálicos parte 2: Soldadura por arco de aços ferríticos", 2008.
- [26] NP EN ISO 15614-1, "Especificação e qualificação de procedimentos de soldadura para materiais metálicos. Prova de procedimento de soldadura. Parte 1: Soldadura por arco e gás de aços e soldadura por arco de níqueis e suas ligas", 2005.
- [27] Filomena P. Almeida, João Barata e Pedro Barros, "Ensaaios não destrutivos", Ed. ISQ, 1993.
- [28] EN ISO 17637, "Non-destructive testing of welds – Visual testing of fusion-welded joints", 2011.

- [29] ISO 17636-1, "Non-destructive testing of welds – Radiographic testing. Part1: X- and gamma-ray techniques with film", 2013.
- [30] BS EN ISO 10675-1, "Non-destructive testing of welds. Acceptance levels for radiographic testing. Steel, nickel, titanium and their alloys", 2013.
- [31] BS EN 571-1, "Non-destructive testing of welds - Penetrant testing. General principles", 1997.
- [32] BS EN ISO 23277, "Non-destructive testing of welds - Penetrant testing of welds. Acceptance levels", 2009.
- [33] BS EN ISO 5173, " Destructive tests on welds in metallic materials - Bend tests", 2010.
- [34] ISO 4136, " Destructive tests on welds in metallic materials - transverse tensile test", 2012.
- [35] ISO 9015-1, "Destructive tests on welds in metallic materials - Hardness testing - Part1: Hardness test on arc welded joints", 2001.
- [36] ISO 17639, "Destructive tests on welds in metallic materials - Macroscopic and microscopic examination of welds", 2003.
- [37] ISO 9016, "Destructive tests on welds in metallic materials - Impact tests - Test specimen location, notch orientation and examination", 2012.
- [38] ISO 148-1, "Metallic materials - Charpy pendulum impact test - Part 1: Test method", 2006.
- [39] ASTM E23, "Standard methods for notched bar impact testing of metallic materials".
- [40] NP EN ISO 4063, "Soldadura e processos afins - Nomenclatura dos processos e números de referência", 2011
- [41] ISO/TR 15608, "Welding - guidelines for a metallic materials grouping system", 2013
- [42] W.F.Smith, " Príncípios de Ciência e Engenharia dos Materiais", 3ª ed., McGRAW-HILL, 1993.
- [43] EN 1011-1, " Welding - Recommendations for welding of metallic materials - Part 1: General guidance for arc welding", 1998.
- [44] ISO 17635, "Non-destructive testing of welds - General rules for metallic materials", 2010
- [45] ISO 5817, "Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) - Quality levels for imperfections", 2014

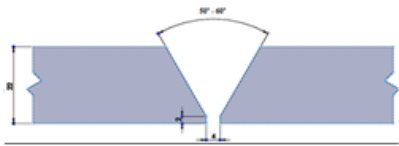
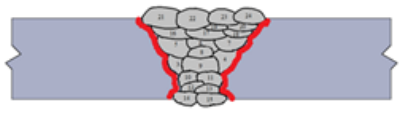


## **7. Anexos**

# Anexo A1 - Especificação de procedimento de soldadura - FLUXOFIL 19HD

ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDADURA Referência: ISO 15614-1

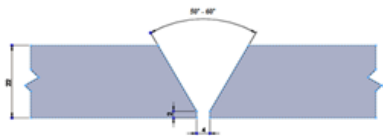
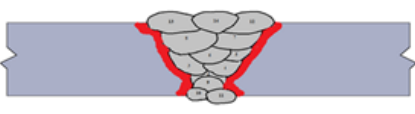
EPS NºRQPS Nº

<b>1. EMPRESA</b>																					
Morada:	Estrada Mitrena, 2910-738 Setúbal																				
DATA:	23-09-2014																				
<b>2. SOLDADOR</b>																					
Nome:	Hugo João Osório Jorge																				
ID:	500081																				
<b>3. METAL DE BASE</b>																					
I.	Designação: S355J2+N Grupo: 1.2 Espessura (mm): 22 Diâm. (mm): Proveniência: MAKSTIL Tipo: Chapa Vazamento: 456531																				
II.	Designação: Grupo: Espessura (mm): Diâm. (mm): Proveniência: Tipo: Vazamento:																				
<b>4. METAL DE ADIÇÃO</b>																					
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Tipo</th> <th>Designação</th> <th>Designação comercial</th> <th>Nº Lote</th> <th>Diâmetro (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>Fio</td> <td>T46 3PC1H5</td> <td>FLUXOFIL 19HD</td> <td>39526312</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>C</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Tipo	Designação	Designação comercial	Nº Lote	Diâmetro (mm)	A	Fio	T46 3PC1H5	FLUXOFIL 19HD	39526312	B					C				
Tipo	Designação	Designação comercial	Nº Lote	Diâmetro (mm)																	
A	Fio	T46 3PC1H5	FLUXOFIL 19HD	39526312																	
B																					
C																					
<b>5. PROCESSO DE SOLDADURA</b>																					
Corrente/Polaridade:	DC-																				
Modo de transferência:																					
Eléctrodo não consumível (tipo, medida):																					
<b>6. PROTECÇÃO GASOSA</b>																					
Gás de protecção:	CO2 Caudal: 15l/min																				
Diam. bocal (mm):																					
Gás de purga:	Caudal:																				
<b>7. CONCEPÇÃO DE JUNTA</b>																					
Esquema																					
 																					
<b>8. POSIÇÃO DE SOLDADURA</b>																					
PF																					
<b>9. PREPARAÇÃO DA SOLDADURA</b>																					
Limpeza inicial:	Escovagem																				
Limpeza interpassos:	Escovagem																				
Descarnagem da raiz:	Abertura a carvão																				
<b>10. TÉCNICA DE SOLDADURA</b>																					
Passes:	Múltiplos																				
Nº de fios-eléctodos:	1																				
Tipo cordões:	Corridos																				
Oscilação:																					
Extensão livre e eléctrodo:	10 - 15 mm																				
Martelagem:																					
<b>10. CONTROLO DE TEMPERATURA</b>																					
Pré-aquecimento (°C):	Não																				
Interpassos (°C):	Não																				
Pós-aquecimento (°C):	Não																				
<b>11. PARÂMETROS DE EXECUÇÃO</b>																					
Passe	Raiz	Enchimento	Face																		
Metal de adição (A, B ou C):	A	A	A																		
Intensidade (A):	200-220	190-210	195-215																		
Tensão (V):	24,5-25,5	24,5-25,5	25-26																		
Vel. de Sold (mm/s):	4,3	4	3,8																		
Entrega térmica (J/cm):	9711,6	10215,7	10956,2																		
<b>12. TRATAMENTO TÉRMICO</b>																					
Não	Método:																				
Temperatura de patamar (°C):																					
Taxa aquecimento (°C/h):																					
Tempo de patamar (h):																					
Taxa arrefecimento (°C/h):																					
<b>13. INSPECÇÃO E ENSAIOS</b>																					
Ensaio Não Destrutivos																					
<input checked="" type="checkbox"/> Inspeção visual																					
<input checked="" type="checkbox"/> Radiografia/Ultrasons																					
<input checked="" type="checkbox"/> Liq. Penetr./Part. Magnét.																					
Ensaio Destrutivos																					
<input checked="" type="checkbox"/> Ensaio de tracção	100/14																				
<input checked="" type="checkbox"/> Ensaio de impacto	079/14																				
<input checked="" type="checkbox"/> Ensaio de dobragem	064/14																				
<input checked="" type="checkbox"/> Ensaio de dureza	265/14																				
<input checked="" type="checkbox"/> Macro/Micrografia	299/14																				
<b>14. RESULTADO</b>																					

## Anexo A2 - Especificação de procedimento de soldadura - FABSHIELD XLR-8

ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDADURA Referência: ISO 15614-1

EPS NºRQPS Nº

<b>1. EMPRESA</b>		LISNAVE, ESTALEIROS NAVAIS SA	
Morada:	Estrada Mitrena, 2910-738 Setúbal	DATA:	23-09-2014
<b>2. SOLDADOR</b>			
Nome:	Hugo João Osório Jorge	ID:	500081
<b>3. METAL DE BASE</b>			
I.	Designação: S355J2+N	Grupo: 1.2	Espessura (mm): 22
	Proveniência: MAKSTIL	Tipo: Chapa	Vazamento: 456531
II.	Designação:	Grupo:	Espessura (mm):
	Proveniência:	Tipo:	Vazamento:
<b>4. METAL DE ADIÇÃO</b>			
	Tipo	Designação	Designação comercial
A	Fio	T42 2 Y N 2 H10	Fabshield XLR-8
B			
C			
<b>5. PROCESSO DE SOLDADURA</b>		<b>6. PROTECÇÃO GASOSA</b>	
Corrente/Polaridade:	DC-	Gás de protecção:	Caudal:
Modo de transferência:		Diam. bocal (mm):	
Eléctrodo não consumível (tipo, medida):		Gás de purga:	Caudal:
<b>7. CONCEPÇÃO DE JUNTA</b>			
Esquema			
 			
<b>8. POSIÇÃO DE SOLDADURA</b>		<b>10. TÉCNICA DE SOLDADURA</b>	
<b>9. PREPARAÇÃO DA SOLDADURA</b>			
Limpeza inicial:	Escovagem	Passe:	Múltiplos
Limpeza interpassos:	Escovagem	Nº de fios-eléctodos:	1
Descarnagem da raiz:	Abertura a carvão	Tipo cordões:	Corridos
		Oscilação:	
		Extensão livre eléctrodo:	20-25 mm
		Martelagem:	
<b>10. CONTROLO DE TEMPERATURA</b>			
Pré-aquecimento (°C):	Não	Interpassos (°C):	Não
		Pós-aquecimento (°C):	Não
<b>11. PARÂMETROS DE EXECUÇÃO</b>			
Passe:	Raiz	Enchimento	Face
Metal de adição (A, B ou C):	A	A	A
Intensidade (A):	174-194	200-220	160-180
Tensão (V):	20-21	21-22	21-22
Vel. de Sold (mm/s):	1,8	2,1	0,29
Entrega térmica (J/cm):	17132,4	17219,5	1045,8
<b>12. TRATAMENTO TÉRMICO</b>			
	Não	Método:	
		Temperatura de patamar (°C):	Taxa aquecimento (°C/h):
		Tempo de patamar(h):	Taxa arrefecimento (°C/h):
<b>13. INSPECÇÃO E ENSAIOS</b>			
Ensaio Não Destrutivos		Ensaio Destrutivos	
<input checked="" type="checkbox"/> Inspeção visual		<input checked="" type="checkbox"/> Ensaio de tracção	108/14
<input checked="" type="checkbox"/> Radiografia/Ultrasons		<input checked="" type="checkbox"/> Ensaio de impacto	117/14
<input checked="" type="checkbox"/> Liq. Penetr./Part. Magnét.		<input checked="" type="checkbox"/> Ensaio de dobragem	070/14
		<input checked="" type="checkbox"/> Ensaio de dureza	282/14
		<input checked="" type="checkbox"/> Macro/Micrografia	310/14
<b>14. RESULTADO</b>			